

文章编号: 0258-7025(2004)09-1050-05

小波变换用于半导体激光器可靠性分析

林 虎¹, 郭树旭^{1*}, 赵 蔚², 张素梅¹, 石家伟¹

(¹ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130023)
² 东北师范大学广播电视学院, 吉林 长春 130117)

摘要 应用小波变换奇异性检测原理,对近百只半导体激光器(LD)输出 $I-V$ 特性进行小波变换,通过不同尺度下的变换系数,能够真实、准确地测量和计算半导体激光器的阈值电流以及与可靠性相关的一些参数,模极大值 W_{ij}^M , 结特征参量 m 等。利用这些计算和测量参数,可以直观地比较和判别出半导体激光器的性能优劣及可靠性,与电导数法相结合,可方便、准确、快捷地对器件性能和可靠性进行评估筛选。理论与实验表明,利用小波变换进行半导体激光器的可靠性分析与传统方法相比具有独到之处。

关键词 激光技术;可靠性;半导体激光器;小波变换;奇异性检测

中图分类号 TN 911.23;TN 248.4 **文献标识码** A

Wavelet Transform for Evaluation of Semiconductor Laser Reliability

LIN Hu¹, GUO Shu-xu¹, ZHAO Wei², ZHANG Su-mei¹, SHI Jia-wei¹

(¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region,
College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China)
² School of Broadcast & Television, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract In this paper, based on the wavelet transform's singularity detection principle, the transform coefficients at different scales were given to examine output $I-V$ curve and compute the threshold current and other correlative parameters, such as the modular max W_{ij}^M and junction characteristic parameter m and so on. Making use of the above examined parameters combining with electrical derivative method, the reliability of semiconductor laser and quality of device can be compared directly and evaluated accurately. The theory and the experiment indicate that compared with the other classic methods, this method is distinct.

Key words laser technique; reliability; semiconductor laser; wavelet transform; singularity detection

1 引 言

半导体激光器(LD)的可靠性检测对它的研制、生产和应用至关重要。国内外常规的方法都是采用电老化进行器件的检测和筛选,但此方法存在两个主要问题:1) 老化筛选是一种有损检测,使好的器件受到损伤,影响使用寿命;2) 老化所需时间比较长,当全部器件参加老化时,老化台利用率低。所以,建立一种有效、无损、方便、快捷的判别方法,与电老化方法互补结合,对器件筛选、检测和分类是十

分必要的。

1985年,美国 Bell 实验室 Choy 报道了用电导数曲线阈值后与纵轴的截距 b 和 b 随温度的变化 $\Delta b/\Delta T$,对 20 支 GaAs/GaAlAs 激光器进行可靠性分析,给出 b 与 $\Delta b/\Delta T$ 的大小与器件可靠性有关的实验结果^[1]。从 20 世纪 90 年代初开始,我们对这种电导数技术进行了跟踪研究,对不同结构、不同材料系的半导体激光器进行了电导数测试,对相关参数与器件质量和可靠性之间的内在联系进行了理论和实验研究^[2~4]。特别是近年来对大功率量子阱半

收稿日期:2003-05-12;收到修改稿日期:2003-06-30

基金项目:教育部高等学校骨干教师计划基金(教技司[2000]65号)资助项目。

作者简介:林 虎(1976—),男,吉林大学电子科学与工程学院硕士研究生,主要从事数字信号处理的研究。

* 通信联系人。E-mail:guosx@mail.jlu.edu.cn

导体激光器的研究表明^[5,6]，电导数的测试参数可以给出大功率量子阱激光器质量和可靠性的评价，这些工作都是在时域中进行的。本文应用小波分析，对半导体激光器输出信号中的奇异点和不规则突变点进行检测分析，将这些电信号中包含的可靠性信息，在时频域同时进行分解，获得了更高的分辨率，或者说更多的器件可靠性细节信息。

2 信号奇异性检测原理

2.1 小波函数与小波变换

设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ ，满足允许性条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 。用尺度因子 s 对 $\psi(t)$ 作压扩，得压扩后的函数 $\psi_s = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{t}{s}\right)$ ，则在尺度 s ，位置 t 处函数 $f(t)$ 的小波变换定义为^[7]

$$W_s f(t) = f(t) * \psi_s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mu) \psi_s(t - \mu) d\mu \tag{1}$$

式中 $*$ 表示卷积。 $\psi(t)$ 为小波函数，简称小波。

式(1)中尺度 s 是在实数域中连续取值的。为方便起见，可以基 2 方式离散地取值，即 $s = 2^j (j \in Z, Z$ 表示整数集合)，则有基 2 小波变换

$$W_{2^j} f(t) = f(t) * \psi_{2^j}(t) \tag{2}$$

对数字信号，式(2)中的变量 t 需离散化。对于能量有限的离散信号 $D = [d_n] (n \in Z)$ ，那么由(3)式求 D 的小波变换

$$W_{2^j}^d f = [W_{2^j} f(n + \nu)] \quad (n \in Z) \tag{3}$$

式中上角标 d 表示离散采样， ν 为采样平移参数，它的取值取决于小波 $\psi(t)$ 。 $\{W_{2^j}^d f\} (j \in Z)$ 称为离散基 2 小波变换，简称小波变换。

2.2 李氏指数

数学上通常采用李氏指数来描述某点的奇异性，它是表征函数局部特征的一种度量。其定义如下：

设有整数 $n, n < \alpha \leq n + 1$ ，如果存在常数 $A > 0$ 以及 n 次多项式 $p_n(t)$

$$|f(t_0 + h) - p_n(t_0 + h)| \leq A |h|^\alpha \tag{4}$$

则称 $f(t)$ 在 t_0 处的李氏指数为 α ，式中 h 是一个充分小量。当 $n = 0$ 时， $p_n(t) = f(t_0)$ ，当 $n \geq 1$ 时， $p_n(t)$ 为 $f(t)$ 在 t_0 的 Taylor 展开式的前 $n + 1$ 项。

显然 $f(t)$ 在 t_0 点的李氏指数 α 的上界刻画了函数在该点的正则性，称为 $f(t)$ 在点 t_0 的李氏正则

性。 α 越大，函数越光滑。函数在一点连续、可微，则在该点的 $\alpha = 1$ ；在一点可导，而导数有界不连续时， α 仍为 1。

2.3 奇异点的李氏指数同小波变换模极大值之间的关系

奇异性指数一般同小波变换模极大值有关，对小波变换相平面上某点 (t_0, s_0) ，当 $t \in (t_0 - \delta, s_0)$ ， $|W_{s_0} f(t)| < |W_{s_0} f(t_0)|$ ，并且当 $t \in (t_0 + \delta, s_0)$ 时， $|W_{s_0} f(t)| < |W_{s_0} f(t_0)|$ ，称 (t_0, s_0) 为局部模极大值点。如果在小波变换的相平面上有这样的曲线，曲线上所有的点都是局部模极大值点，该曲线称为模极大值线。

假设小波 $\psi(t)$ 是连续可微的，并且在无限远处的衰减速率为 $O\left(\frac{1}{1+t^2}\right)$ 。Mallat 证明：当 t 在区间 $[a, b]$ 中时，如果 $f(t)$ 的小波变换满足

$$|W_s f(t)| \leq ks^\alpha \tag{5}$$

即 $\lg |W_s f(t)| \leq \lg k + \alpha \lg s$ \tag{6}

其中 k 是一个常数，则 $f(t)$ 在区间 $[a, b]$ 中的李氏指数均为 α 。

当 $\alpha = 2^j$ 时，上式变成

$$|W_{2^j} f(t)| \leq k(2^j)^\alpha \tag{7}$$

即 $\lg |W_{2^j} f(t)| \leq \lg k + j\alpha$ \tag{8}

式中 $j\alpha$ 项把小波变换的尺度特征 j 与李氏指数 α 联系起来。式(8)给出了小波变换的对数值随尺度 j 或 α 的变化规律。自然地，对应信号奇异点的小波变换模极大值随尺度的变化也满足此规律。由式(8)知，当 $\alpha > 0$ 时，小波变换的模极大值随尺度 j 的增大而增大；当 $\alpha < 0$ 时，则随 j 的增大而减小；对阶跃情况 ($\alpha = 0$)，则小波变换的模极大值不随尺度改变。

2.4 小波函数的选择

当尺度 j 连续变化时，信号奇异点在时间尺度相平面上至少对应一条极大值线。这意味着可能会出现一个奇异点对应着多条模极大值线的情况。而模极大值线的个数取决于小波函数的消失矩的阶数。消失矩的定义是：对小波函数 $\psi(t)$ ，当且仅当对所有的 $k < n$ ，有

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0 \tag{9}$$

则小波函数 $\psi(t)$ 有 n 阶消失矩。随着消失矩阶数的增加，模极大值线的个数呈线性增加。过多的模极大值线会引起奇异点的混淆，所以，不宜采用具有太高消失矩的小波函数进行奇异性检测。但是，小波函数消失矩的阶数还与所检测奇异点奇异性指数的大小

有关,当待测奇异点李氏指数的上限为 n 时,则采用的小波函数至少应具有 n 阶消失矩。这样综合考虑,选择小波函数的原则是在满足能够检测到最大李氏指数值的前提下,选择具有最少消失矩的小波函数。一般,当函数 $f(t)$ 在 t_0 点的李氏指数 α 满足 $n \leq \alpha < n + 1$ 时,采用具有 $n + 1$ 阶消失矩的小波函数。目前采用比较多的是 B 样条小波函数和墨西哥草帽小波函数。

3 半导体激光器电压电流特性中的奇异性

3.1 半导体激光器的电压电流特性及电导数测试法

半导体激光器等效电路如图 1(a)所示,理想情况下简化为图 1(b)。

二极管电流电压特性方程可写为

$$I = I_s[\exp(qV_j/mkT) - 1] \quad (10)$$

其中 I_s 为二极管 D_1 的反向饱和电流, V_j 为二极管两端偏压, q 为电子电量, m 为其结特征参量, k 为玻尔兹曼常数,在正向电压下

$$I = I_s \exp(qV_j/mkT) \quad (11)$$

因为 $V = IR_1 + V_j$, 所以有

$$I = I_s \exp[q(V - IR_1)/mkT] \quad (12)$$

由上式可得

$$V(I) = IR_1 + (mkT/q) \cdot \ln(I/I_s) \quad (13)$$

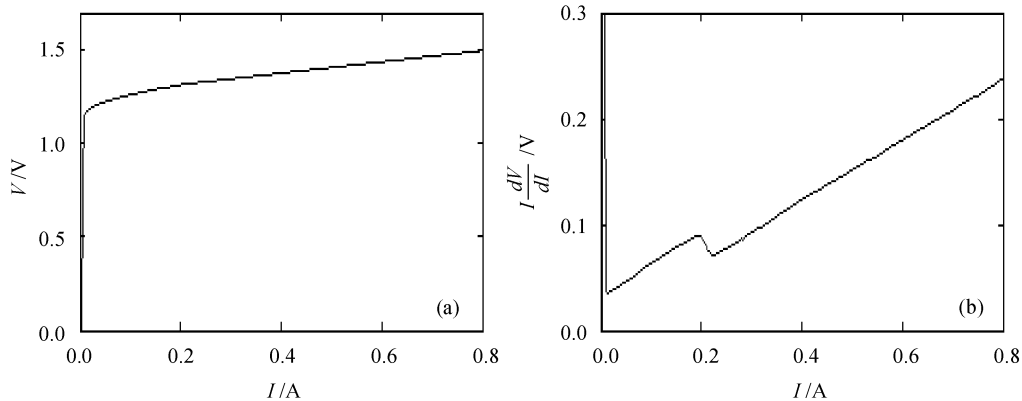


图 2 半导体激光器的电压电流特性曲线(a)和电导数曲线(b)

Fig. 2 V-I characteristic curve (a) and electrical derivative curve (b) of semiconductor laser

3.2 用小波变换检测半导体激光器的阈值电流

从上节中可以看出,半导体激光器的电压电流特性曲线在阈值电流处一阶导数有界但不连续,所以,此曲线在阈值电流处的李氏指数为 1,因此,必须采用消失矩至少等于 2 的函数作为小波函数对它

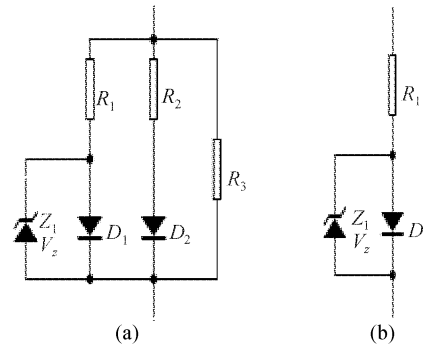


图 1 (a) LD 等效电路;(b) LD 简化等效电路
Fig. 1 (a) Laser diode (LD) equivalent circuit;
(b) LD simplified equivalent circuit

在理想半导体激光器中,由于受激时电子和空穴高速复合,结电压在阈值以上为定值,因此 $I > I_{th}$ 时, $V-I$ 关系变为

$$V(I) = IR_1 + V_{jth} \quad (14)$$

其中,阈值结电压 V_{jth} 为常数。

图 2(a)为半导体激光器的电压电流特性曲线。 $I = I_{th}$ 点是奇异点,文献[4]用电导数测试法检测该奇异点。具体方法是:对电压电流曲线求导之后再乘上电流,得到 $I dV/dI$ 曲线,该曲线在阈值处有一定的下沉,由此可以检测出该点,如图 2(b)所示。但有些半导体激光器的电压电流曲线用电导数测试之后下沉不太明显,此时确定阈值电流就有一定的困难。

进行奇异性分析。

为了检测阈值电流,要求小波 $\psi(t)$ 应为某一光滑函数 $\theta(t)$ 的二阶导数。在这里,把三阶样条函数的二倍膨胀作为光滑函数 $\theta(t)$ (如图 3(a)),取它的二阶导数为小波函数 $\psi(t)$ (图 3(b)), $\theta(t)$ 和 $\psi(t)$ 的

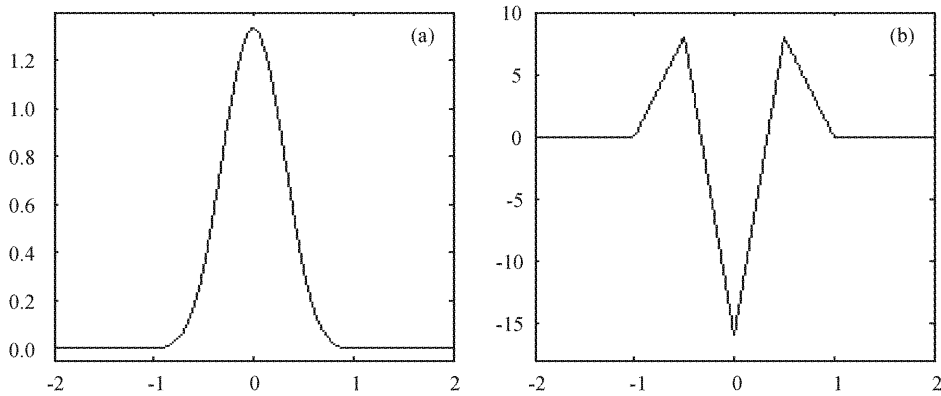


图 3 光滑函数 $\theta(t)$ (a) 和小波函数 $\psi(t)$ (b)
Fig. 3 Slick function $\theta(t)$ (a) and wavelet function $\psi(t)$ (b)

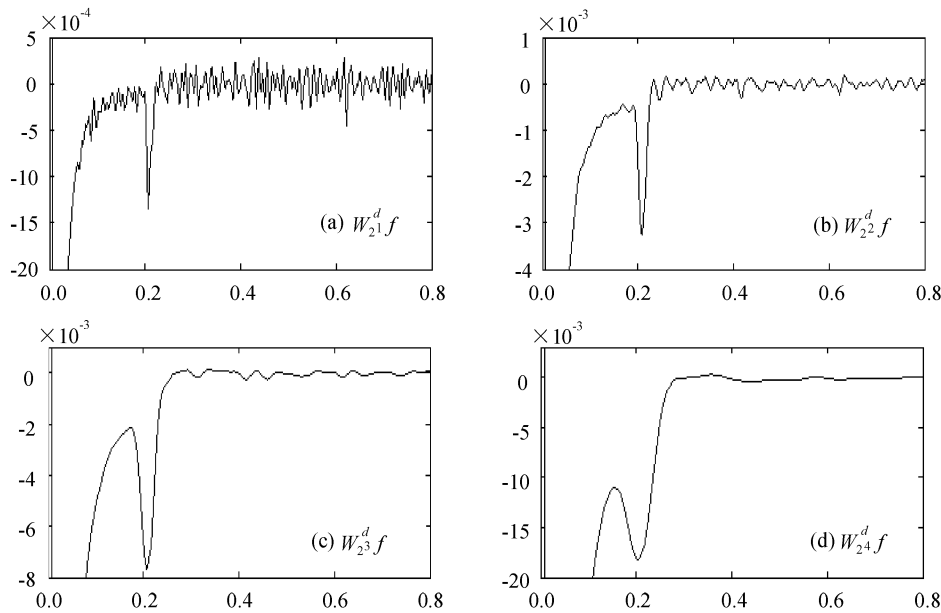


图 4 不同尺度下的小波变换结果
Fig. 4 Coefficients of wavelet transform at different scale

傅里叶变换分别为

$$\hat{\theta}(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/4)}{\omega/4} \right]^4 \quad \hat{\psi}(\omega) = -\omega^2 \left[\frac{\sin(\omega/4)}{\omega/4} \right]^4 \quad (15)$$

图 4(a)~(d) 分别给出了半导体激光器的电压电流特性曲线在不同尺度小波变换后的结果。为了能充分反映曲线本身的奇异性,特性曲线在采样时,采样频率比较大,每注入一次电流,采 320 个点。采样后的曲线进行离散基 2 小波变换。为了与特性曲线中的电流横坐标相对应,对所选小波函数按下式膨胀

$$\psi(I) = \psi(t) \Big|_{t=\frac{320}{0.8}I} \quad (16)$$

采样平移参数 ν 取 0, 选择尺度从下界 2^1 开始,

直至上界 2^4 。

从图 4 可知,在尺度达到一定程度时,小波变换后的每一条曲线上都出现模极大值点,并且它们的位置都相同,与电导数曲线的下沉点位置重叠。因此,由小波奇异性原理可以断定特性曲线的阈值电流点就是小波变换后的模极大值点,从而可以准确测量出阈值电流。

值得注意的是必须在一定的尺度上才能检测出阈值电流。对于有些半导体激光器来说,当尺度小于一定程度时,因为噪声的存在,可能出现很多伪极值点,因此分不清哪一个是阈值电流点。又因 $I=0$ 点也是一个奇异点,并且小波变换曲线上的幅度比阈值电流处的幅度大得多,所以当尺度大到一定程

度时,阈值电流点的闭包被 $I = 0$ 点的闭包所覆盖,因此,这时也检测不到阈值电流。本文选择尺度 $j = 2, 3, 4$, 在这些尺度上能够准确检测出阈值电流。

3.3 半导体激光器的可靠性分析

通过上述小波变换曲线,可以测量或计算出模极大值 $W_{2^j}^M$, 结特征参量 m 等参数,这些参数与器件的性能和可靠性有密切的关系,因此可以通过半导体激光器的奇异性及参数的测量来分析器件的性能和可靠性。

1) 模极大值 $W_{2^j}^M$

模极大值 $W_{2^j}^M$ 表示尺度为 j 的半导体激光器 $V-I$ 特性的小波变换曲线中,阈值电流所对应的幅度值,它可以直接在小波变换曲线上测出。因为器件有与结相并联的线性电阻和非线性电阻路径的存在以及串联电阻,这些都影响 $W_{2^j}^M$ 值的大小。结区漏电、电流扩展、有源区不均匀等因素都会使 $W_{2^j}^M$ 值偏小。对于同种器件, $W_{2^j}^M$ 值的差异是器件的材料参数、结构参数差异以及工艺分散性等诸多因素造成的。 $W_{2^j}^M$ 值偏小的器件往往可靠性差。表 1 列出了经过一百多只大功率半导体激光器的测量之后,特征正常的器件的 $W_{2^j}^M$ 值范围。

表 1 特征正常的器件的 $W_{2^j}^M$ 值范围
Table 1 $W_{2^j}^M$ range of the natural devices

j	2	3	4
$W_{2^j}^M$	2.5~4 mV	6~9 mV	15~20 mV

2) 结特征参量 m

二极管电流电压方程 $I = I_s \left(\exp \frac{qV_j}{mkT} - 1 \right)$ 中的 m 值,称为结的特征参量或理想因子,是结特性的重要标志。在半导体激光器的小波变换曲线中,阈值电流对应的幅度值是模极大值,因此可得到下式

$$W_{2^j}^M = V(I) * \psi_{2^j}(I) |_{I=I_{th}} \quad (17)$$

由式(13)~(16),再加上所选小波函数的偶特性,经过简化就可以得到对应的 m 值

$$m = \frac{W_{2^j}^M q}{16kT} \cdot \{ [1 + 2^{-j} \cdot 400I_{th}(7j - 8)] \ln 2 - 7 \cdot 2^{-j} \cdot 400I_{th} \}^{-1} \quad (j = 2, 3, 4) \quad (18)$$

m 与结区的载流子输运特性,结的界面状况,结区内缺陷、杂质等非辐射复合中心以及与结相串并联支路的存在有关。对于半导体激光器, m 值的大小是材料质量和工艺水平的标志,因此与器件可靠性密切

相关。 m 值小的器件外延层内缺陷、位错及工艺过程中的内应力损伤比较小,这样的器件一般来说是高可靠的。 m 值大的器件材料中的缺陷、位错深能级杂质以及应力损伤造成非辐射复合,释放出的能量作用于晶格,加速暗线暗斑的形成和增长以及缺陷向有源区运动,加速量子效率的降低和阈值的提高,使器件快速退化。另外 m 值受欧姆接触好坏的影响,欧姆接触不好,相当于串联非线性电阻的存在,这势必增大 m 值。对一百多只大功率半导体激光器的测量结果表明,特性正常的器件 m 值在 1.8~3.0 之间。

4 结 论

根据小波变换奇异性检测原理,本文所构造的半导体激光器输出 $I-V$ 特性的小波变换曲线,能够真实、准确地测量和计算半导体激光器的阈值电流和一些与可靠性相关的参数、模极大值 $W_{2^j}^M$ 和结特征参量 m 。利用这些测量参数,能够直观地比较和判别出半导体激光器的性能和优劣,从而可以方便、准确、快捷地对器件的性能和可靠性进行评估筛选。

参 考 文 献

- 1 M. M. Choy, C. E. Barnes. Effective screen for fast aging InGaAsP BH lasers using electrical derivatives [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(19):846~848
- 2 Shi Jiawei, Jin Enshun, Gao Dingsan. The junction voltage saturation and reliability of semiconductor laser [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**(7):775~781
- 3 Ma Dongge, Shi Jiawei, Jin Enshun *et al.*. Low frequency optical noise and electrical noise investigation of 1.3 μm InGaAsP/InP superluminescent diodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(9):785~790
马东阁, 石家伟, 金恩顺 等. 1.3 μm InGaAsP/InP 超辐射发光二极管的低频光电噪声研究[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(9):785~790
- 4 Shi Jiawei, Jin Enshun, Li Hongyan *et al.*. The characteristic junction parameter of a semiconductor laser and its relation with reliability [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, **28**(6):647~651
- 5 Li Hongyan, Shi Jiawei, Jin Enshun *et al.*. Effective method for evaluation of semiconductor laser quality [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, **40**:333~337
- 6 Li Hongyan, Shi Jiawei, Jin Enshun *et al.*. An application of the electrical derivative measurement in rapid screening of high-power semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6):507~510
李红岩, 石家伟, 金恩顺 等. 电导数测试用于大功率半导体激光器的快速筛选[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6):507~510
- 7 Qin Qianqing, Yang Zongkai. *Applied Wavelet Analysis* [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press House, 1994. 17
秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. 17