

吉林大学

---

博士学位论文

---

半导体激光器噪声特性研究

---

姓名：胡贵军

---

申请学位级别：博士

---

专业：微电子学与固体电子学

---

指导教师：石家纬

---

2001.12.1

## 提 要

本论文研究了噪声在半导体激光器的质量表征和可靠性评价方面的应用。首次测量和分析了腔面状况改变对于器件噪声的影响,讨论了器件噪声与表面电流的相关性。分析了表面态,界面态,串并联回路,内部缺陷对噪声和器件质量的影响,这对确定噪声来源进而分析失效机制具有指导意义。首次将器件在小注入下的噪声引入半导体激光器的可靠性筛选,提高了筛选的准确率。从测试电流和判据选择以及噪声判据阈值确定等方面提出了提高筛选准确性的新措施,并与实际老化结果进行了对照。首次将小波分析引入半导体激光器噪声信号处理和器件可靠性分析。用小波变换的方法有效地提取了噪声信号中的 $1/f$ 成分,精确定位了器件 g-r 噪声的转折频率,分析了不同器件噪声信号中的奇异性和奇异点,根据分析结果,对器件可靠性进行了评价。

作者还建立了半导体激光器噪声测试系统,系统的本底噪声小于  $1\text{ nV/Hz}^{1/2}$ , 采用互谱技术后,本底噪声可以达到  $0.1\text{ nV/Hz}^{1/2}$ 。

# 前 言

研究半导体激光器的可靠性规律和失效机理,对于改善器件性能,提高器件寿命有着重要意义,成为当前研究的热点。器件失效可分为早期失效和使用期失效。前者多是由于设计或工艺失误造成的质量缺陷所致,可以通过常规参数检验和筛选进行检测。后者则由器件中的潜在缺陷引起的,潜在缺陷的行为与时间和应力有关,在器件工作初期和正常应力条件下,几乎显不出对器件性能的影响,只有在长时间工作后或在过应力作用下,才会引起器件性能的变化和退化。噪声正是这类主要影响可靠性的潜在缺陷极为敏感的参数,是器件质量和可靠性的一种简便而有效的表征手段。

目前,国际上诸多学者开展了噪声用于电子器件缺陷表征和可靠性筛选方面的研究工作。结果表明,噪声在确定半导体器件中缺陷的特性参量、评价超大规模集成电路的电迁移、确定电迁移的微观结构、检测亚微米 MOS 器件中的热电子损伤等方面有优势,具有快速、敏感、有效、非破坏等优点。正因为如此,国外已将噪声筛选方法应用于双极晶体管、齐纳二极管、GaAs MESFET 和压敏电阻等有高可靠性要求的器件。但噪声在半导体激光器质量表征和可靠性筛选方面的报道却很少。

本文首先对半导体激光器的噪声特性进行了综述,介绍了测量器件噪声的常用方法。采用直接测量方法,结合互谱技术,建立了半导体激光器噪声测试系统,系统的本底噪声小于  $1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。在此基础上,首次开展了噪声用于大功率量子阱半导体激光器质量表征和可靠性评价等方面的研究工作。测量和分析了腔面状况改变对噪声的影响,讨论了噪声与表面电流的相关性,为评价器件腔面状况提供了一种新的手段。分析了表面态,界面态,串并联回路,内部缺陷对噪声和器件质量的影响,这对确定噪声来源进而分析失效机制具有指导意义。首次将器件在小注入下的噪声引入半导体激光器的可靠性筛选。70 余只器件的噪声测试和老化实验表明,器件小注入下的噪声反映了器件表面及有源区内部状况的好坏,与器件质量和可靠性密切相关。把器件小注入下的噪声大小作为器件可靠性筛选的判据之一,提高了筛选的准确率。首次将小波分析引入半导体激光器噪声信号处理和器件可靠性分析。用小波变换的方法有效地提取了噪声信号的  $1/f$  成分,精确定位了器件 g-r 噪声的转折频率,分析了不同器件噪声信号中的奇异性和奇异点,为半导体激光器噪声信号分析和器件可靠性评价提供了一个新的手段。

## 第一章 半导体激光器噪声综述

### § 1.1 引言

光电子技术是当代高新技术的重要组成部分，对国民经济和国防建设起到举足轻重的作用，随着光电子技术的迅速发展，半导体激光器(LD)作为一种重要的光电子器件，已广泛地应用于光纤通信，信息存储，医疗，光传感以及泵浦固体激光器和光纤放大器等诸多领域。半导体激光器在工作时，由于自发发射的偶然性使光场的相位起伏并造成输出激光有一定的谱线宽度，同时还不断地改变着光场的强度和相位。激光器输出强度的起伏就表现为光强度噪声，而相位起伏表现为光相位（频率）噪声。它们都来源于激射过程本身的量子特性。这些噪声给半导体激光器的实际应用带来许多问题，如在模拟通信系统中，强度噪声将导致系统的信噪比下降；在相干通信系统中，相位（频率）噪声将使光源的谱线变宽，降低接收机的灵敏度。另外激光器即使是在恒定偏流下工作，pn结两端的电压也会出现涨落，这种涨落表现为电噪声。电噪声反映了材料或器件的不完整性，与器件和质量息息相关，在评价器件质量和可靠性方面显示了巨大的潜力，近年来引起了人们的极大兴趣。所以在半导体激光器问世不久，人们就开始了对其噪声特性的研究<sup>[1]</sup>，特别是近年来，随着半导体激光器在各个领域的广泛应用，器件的噪声问题更是引起了人们的普遍关注，对噪声的研究也更加深入和全面<sup>[2-26]</sup>。

### § 1.2 半导体激光器的光噪声

#### 1.2.1 光强度噪声

强度噪声产生于自发发射涨落。在给定频率下的强度噪声一般用相对强度噪声来表征，其定义为

$$RIN = \frac{S_p(\omega)}{P^2} \quad (1.1)$$

$S_p(\omega)$ 是输出光功率涨落的功率谱密度， $P$ 是光功率的平均值。分析表明相对强度噪声的大小与偏置水平有直接的关系。在低于阈值时，相对强度噪声随注入电流的增大而略有减小，在阈值附近有最大值。当注入电流大于

阈值以后，相对强度噪声反比于偏置水平，即激光器的工作电流越高，相对强度噪声功率越低，而噪声谱则更宽了。强度噪声的功率谱密度分布（噪声功率随频率的变化）曲线有一个谐振峰，如图 1-1 所示。峰值对应的频率称为弛豫振荡频率。频率的范围从  $GHz$  到几十  $GHz$ ，与载流子寿命  $\tau_r$ ，光子寿命  $\tau_p$  和注入电流有关。

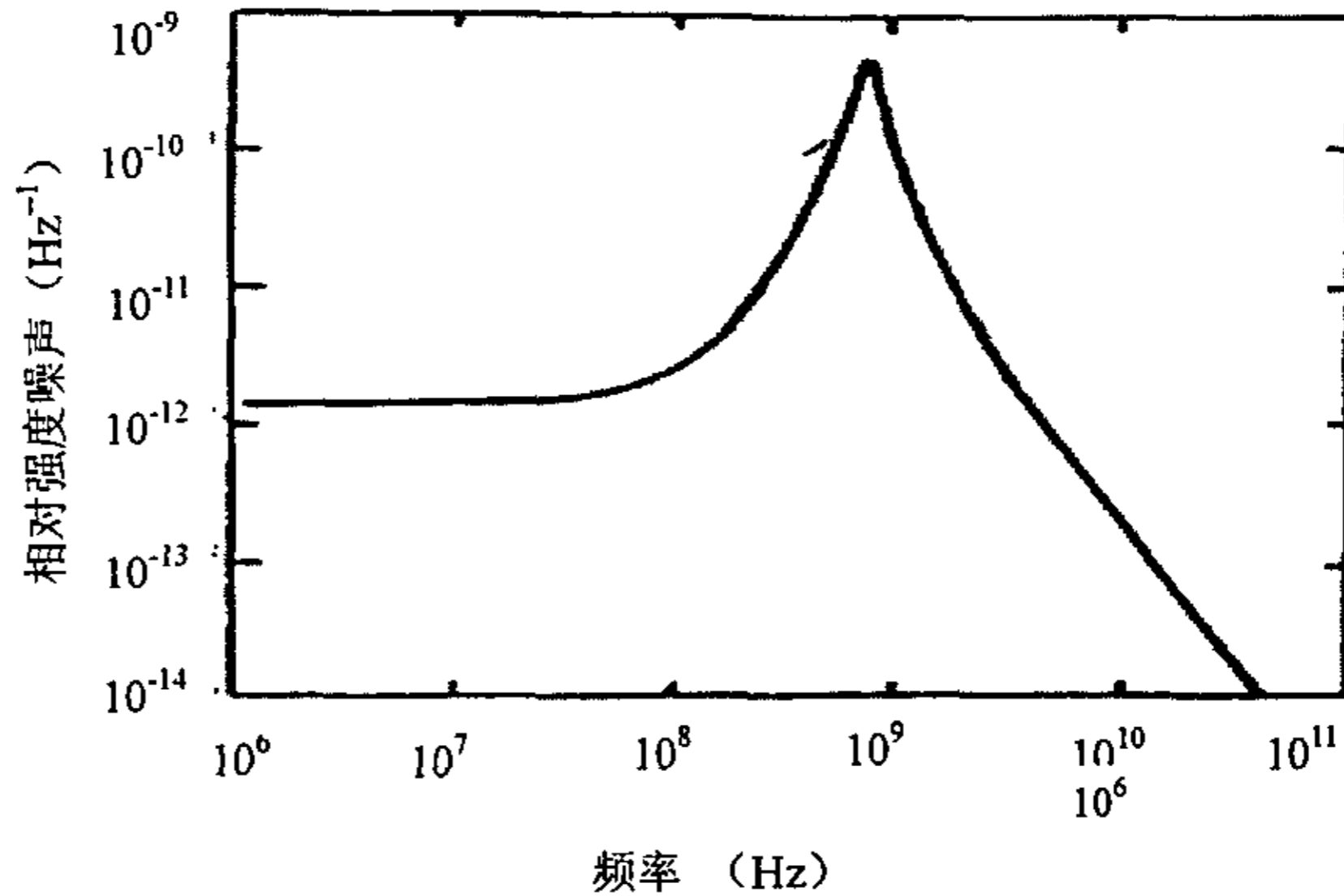


图 1-1 光强度噪声谱密度

假设增益涨落和自发发射涨落不相关，则光强度噪声与输出光功率的平均值之间满足下面的关系<sup>[27]</sup>

$$S_p \propto P^m \quad (1.2)$$

在自发发射时，自发发射涨落引起的强度噪声占主导地位，此时  $m=2/3$ ，即

$$S_p \propto P^{2/3} \quad (1.3)$$

在阈值附近的超辐射区，增益涨落将严重影响输出光功率的稳定，此时

$$S_p \propto P^4 \quad (1.4)$$

在激光区，吸收系数涨落对输出光功率涨落的贡献很小，强度噪声主要是由增益涨落对往返于谐振腔内光子的作用引起的，这时

$$S_p \propto P^{0.1} \quad (1.5)$$

产生强度噪声的原因是由于光子在腔内的动力学行为造成的。除自发发射涨落和增益涨落外，载流子浓度涨落也将引起强度噪声，而且载流子涨落引起的噪声要比自发发射涨落和增益涨落引起的噪声大，所以我们通常所测量的强度噪声大多都是由载流子涨落造成的。此外，电流源的电流涨落，由于激光器的自身加热作用或环境温度引起的涨落，量子效率的涨落都会引起强度噪声。另外，载流子迁移率的涨落也是产生光强度噪声的原因。

### 1.2.2 光相位噪声

相位噪声主要起源于自发发射光子相位的随机性以及随着发生的场强和介质折射率的变化。相位噪声最初引起人们的兴趣是在光干涉测量系统中。因为在干涉系统中，相位噪声的存在限制了测量的灵敏度。接下来又发现，在相干光通信系统中，相位噪声是影响接收机灵敏度的重要因素。最近人们又开始从理论和实验上研究相位噪声和激光器输出光信号的谱线形状及谱线宽度之间的关系，进而探讨光源相位噪声大小对光通信系统质量的影响。

对相位噪声的研究，最初主要是在低频段 (<1MHz)。相位噪声的大小与相干光束之间的光程差成正比<sup>[20]</sup> (如图 1-2 所示)，即随着光程差的增加，相位噪声线性增大，当光程差由 0 增加到 40 cm 时，相位噪声大约增加 50-62dBV。这主要是由于激光发射波长的涨落引起的。

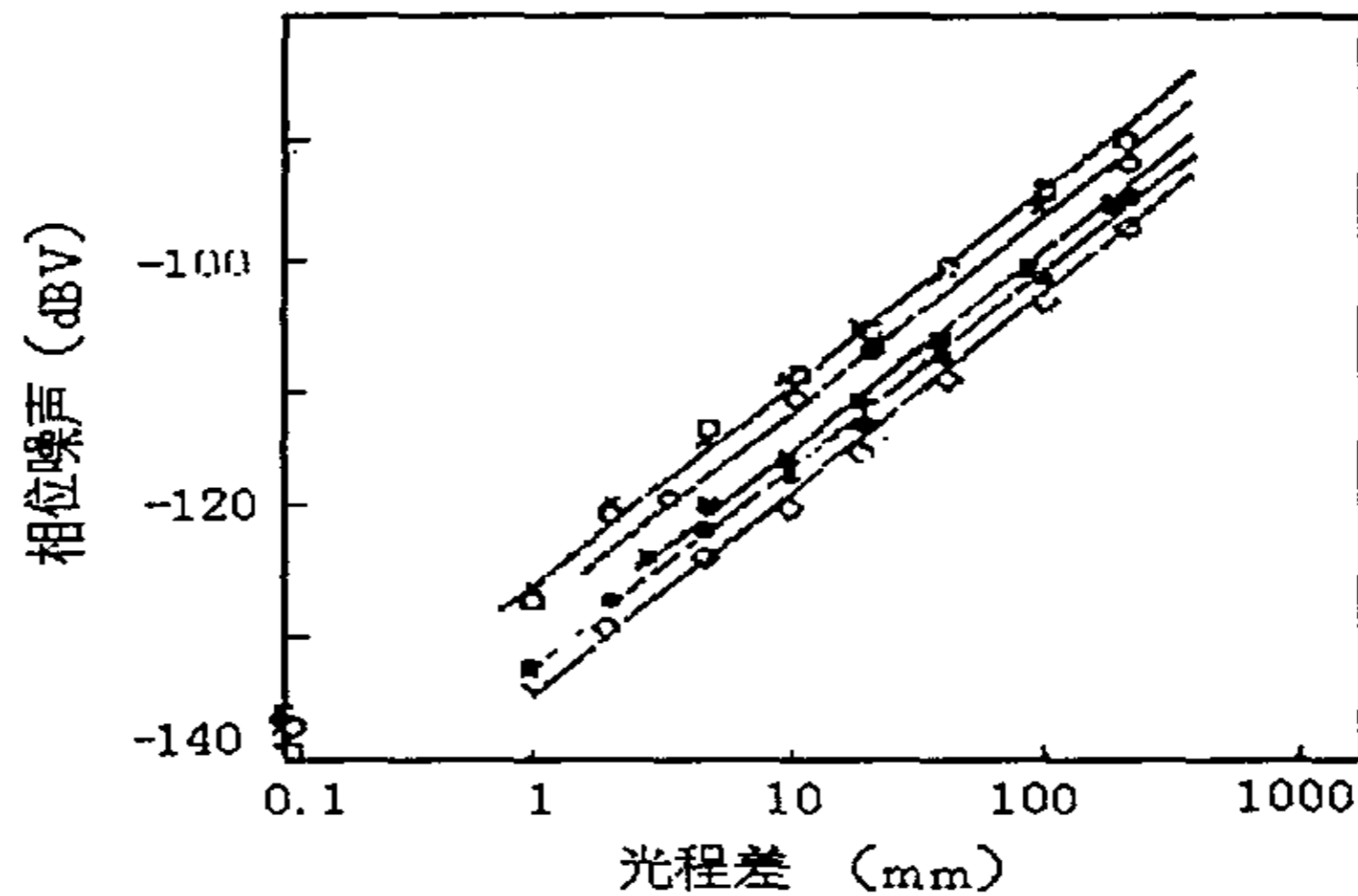


图 1-2 相位噪声与光程差的关系

在阈值以上，相位噪声与驱动电流几乎无关，即随着驱动电流的增大而变化不明显。在宽频率范围内，相位噪声的功率谱密度曲线上有一峰起<sup>[21]</sup>，如图 1-3 所示，这与强度噪声的功率谱密度是一致的，这个峰是由于材料折射率的变化引起的，并使输出光信号的线宽展宽。图 1-3 中的 P1 和 P2 分别是两个不同的光功率值，可见，输出光功率不同，峰值对应的频率也不同。

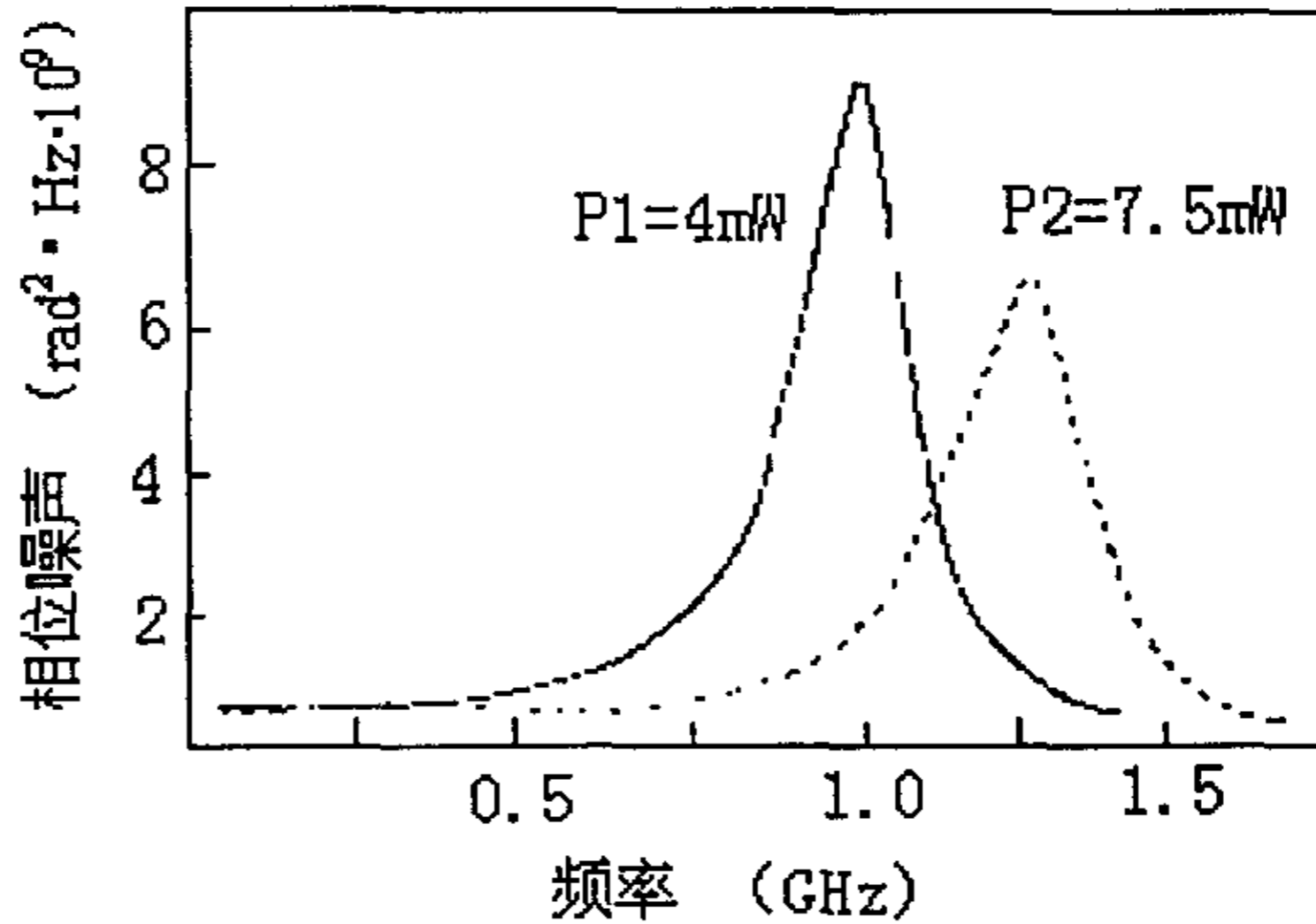


图 1-3 相位噪声与频率的关系

研究相位噪声的一项重要内容就是相位噪声与谱线形状和宽度间的关系。设单模激光器输出光信号中的电场为

$$E(t) = [I(0)]^{1/2} \exp\{i[\omega_0 t + \phi(t)]\} \quad (1.6)$$

$I_0$  是平均输出光强， $\omega_0$  是角频率的平均值。则反映谱线形状的电场的自相关函数为

$$R_e(\tau) = \overline{E(t+\tau)E^*(t)} = \exp(i\omega_0\tau) \exp\left\{-\frac{1}{2}\sigma^2[\Delta_r\phi(t)]\right\} \quad (1.7)$$

$$\text{其中 } \sigma^2(\Delta_r\phi(t)) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{S_\phi(\omega)}{\omega^2} (1 - \cos\omega\tau) d\omega \quad (1.8)$$

称为随机瞬时相位涨落的方差，式中的  $S_\phi(\omega)$  是相位噪声的谱密度。这样通过测量相位噪声的谱密度，由 (1.8) 式就可以得到  $\sigma^2$  与  $\tau$  的关系曲线，

如图 1-4 所示<sup>[22]</sup>。当  $\tau$  较大时,  $\sigma^2$  与  $\tau$  成比例。当  $\tau$  较小时,  $\sigma^2$  在初始阶段与  $\tau^2$  成比, 随后出现振荡行为。这是由于腔内介质折射率的弛豫现象引起的, 它改变了噪声谱的形式, 并在相位涨落中引入了一个非零的相关时间。把

(1.8) 式代入 (1.7) 式, 并对  $R_c(\tau)$  进行傅立叶变换, 就得到谱线形状  $S_E(\omega)$  与相位噪声间的关系, 这样通过测量相位噪声就可以直接得到谱线的形状, 图 1-5 给出了相应的结果。谱线中存在多个峰的原因就是  $\sigma^2$  在  $\tau$  较小时出现振荡的直接结果。

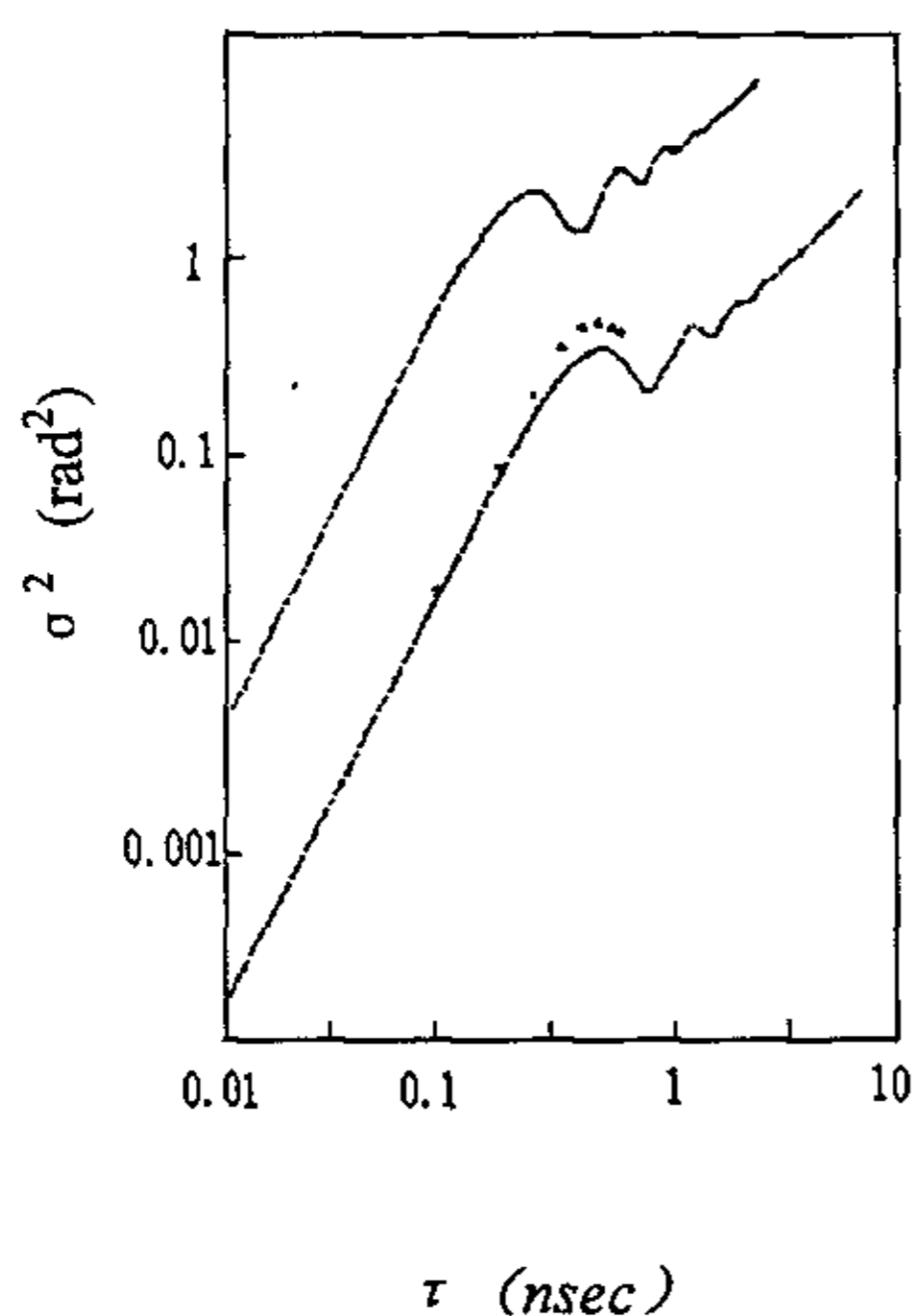


图 1-4  $\sigma^2$  与  $\tau$  关系曲线

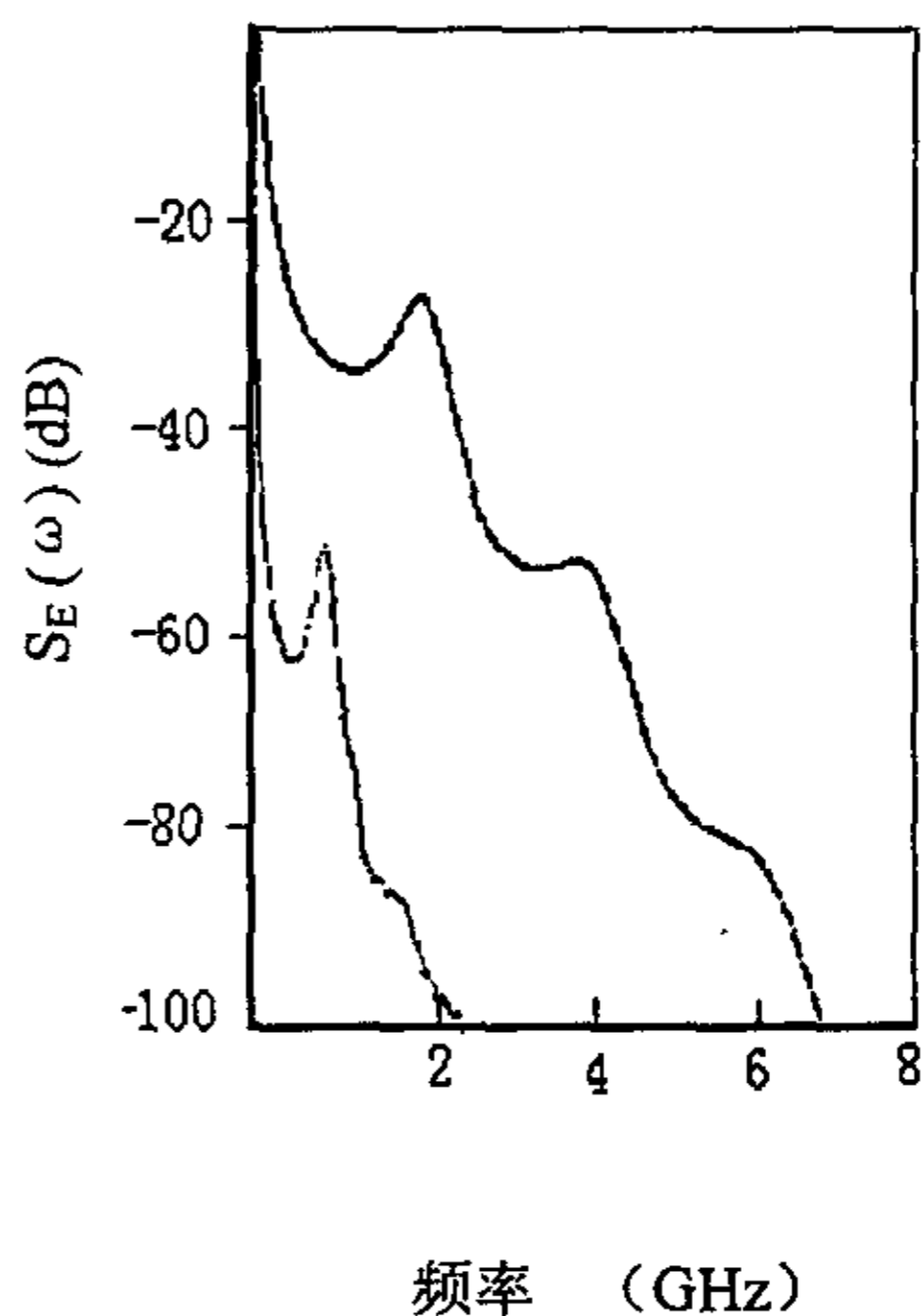


图 1-5 输出光信号的谱线形状

若输出光信号为洛伦兹形式, 则<sup>[13]</sup>

$$R(\tau) = \exp(i\omega_0\tau)\exp(-\pi\Delta\nu_{1/2}T) \quad (1.9)$$

其中  $T$  为绝对温度。设  $\Delta\nu_{1/2}$  为输出光脉冲的半高全宽, 则由 (1.7), (1.8),

(1.9) 得

$$\Delta\nu_{1/2} = \frac{1}{\pi^2 T} \int_0^\infty \frac{S_\phi(\omega)}{\omega^2} (1 - \cos\omega\tau) d\omega \quad (1.10)$$

可见， $S_v(\omega)$  的大小也直接反映了谱线的宽度。

### § 1.3 半导体激光器的电噪声

#### 1.3.1 引言

电噪声是指激光器端电压的涨落，也称为 TEN。激光器电噪声主要是由于载流子的涨落引起的。引起载流子涨落的因素有很多。如注入电流的涨落，载流子复合和产生速率的涨落，光子发射和吸收速率的涨落，以及光增益的涨落等。另外，模式跳变也将引起载流子的涨落。通过对激光的电噪声的测量可以监测激光器的诸多参数和特性<sup>[13-15]</sup>，如弛豫频率，谱线宽度，阈值电流，模式跳变及输出光功率是否稳定等。还可以依据低频电噪声的大小，对器件的可靠性进行评价<sup>[2-7]</sup>，这种方法具有快速、方便、无损等优点。

#### 1.3.2 电噪声的种类

##### 1. 热噪声

在任何一个处于绝对零度以上温度的导体中，载流子都在做无规则运动。这种无规则的热运动迭加在载流子的有规则的运动之上，就引起了电流偏离平均值的起伏。电流的起伏必将在电阻两端引起电压的起伏。这种无规则的起伏称为热噪声 (Thermal noise)。热噪声广泛存在于电阻性元件中。在半导体激光器中，热噪声主要来源于体电阻，接触电阻和二极管的动态微分电阻。

设器件总的等效电阻为  $R$ ，在温度为  $T$ 、带宽为  $\Delta f$  时的热噪声可以用一个与  $R$  相串联的电压源  $E_t$  来表示 (见图 1.6 (a))，也可以用一个与其电导  $g=1/R$  并联的电流源来表示 (见图 1.6 (b))。

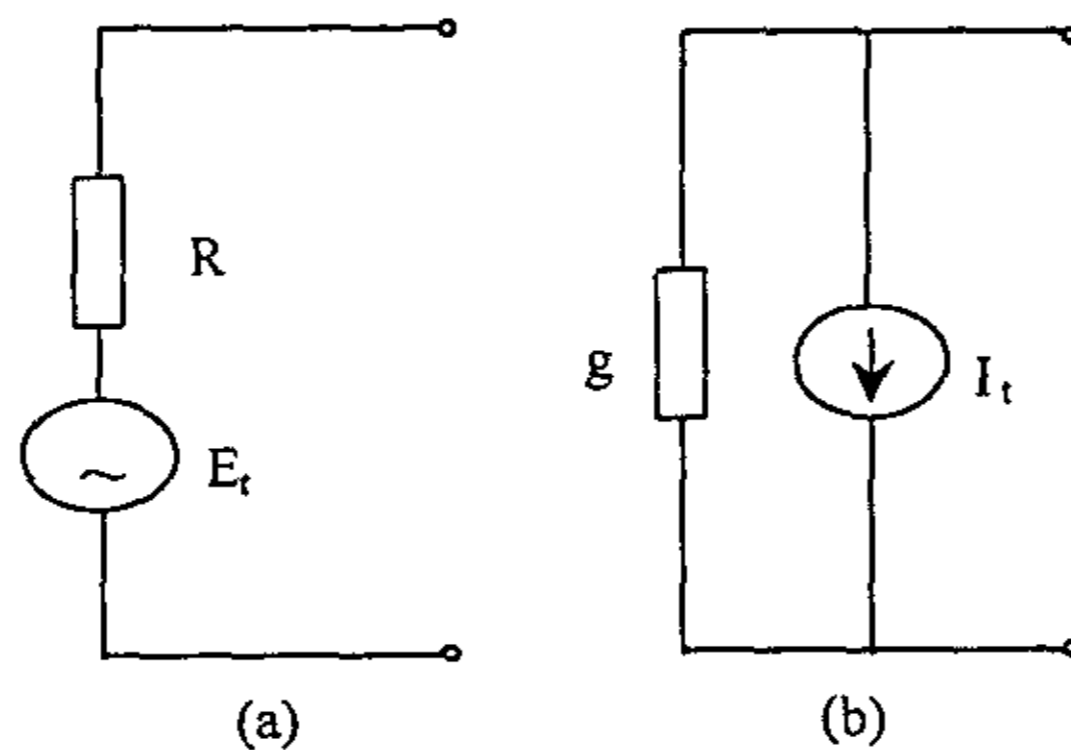


图 1-6 电阻噪声等效电

并服从以下的关系式：

$$E_i^2 = 4kTR\Delta f \quad (1.11)$$

$$I_i^2 = 4kTg\Delta f \quad (1.12)$$

其中  $k$  是玻尔兹曼常数。热噪声的电压和电流的功率谱密度分别为

$$S_v(f) = 4kTR \quad (1.13)$$

$$S_i(f) = 4kTg \quad (1.14)$$

由此可以看出，热噪声的大小与外加电压无关，只与温度和电阻的阻值有关。对于通常的半导体激光器来讲，总的等效电阻很小，所以热噪声也很小，室温下，一般在  $0.1\text{nV/Hz}^{1/2}$  的数量级。

## 2. 散弹噪声

散弹噪声与器件有源区的载流子运动势垒有关，因而主要存在于结型器件中。在半导体激光二极管中，由于载流子跨越 pn 结势垒区的随机性，将引起注入电流的起伏。这种由于载流子各自独立而随机地通过势垒所引起的噪声，称为散弹噪声 (Shot noise)。散弹噪声的电流功率谱密度为

$$S_i(f) = 2qI \quad (1.15)$$

$I$  为流过器件的电流， $q$  为电子的电量。pn 结二极管的  $V$ - $I$  特性可以表示为

$$I = I_0[\exp(qV/kT) - 1] \quad (1.16)$$

式中， $V$  为外加电压， $I_0$  为反向饱和电流。在小注入下，只考虑空穴电流的两个分量：(1) 由 p 区注入 n 区的空穴扩散电流  $I_1 = I_0 \exp(qV/kT)$ ，(2) n 区产生而被 p 区收集的空穴漂移电流  $I_2 = -I_0$ 。这两种电流都是由独立而随机地穿过结势垒的载流子组成，从而表现为纯散弹噪声。上述二种电流噪声的谱密度可以直接相加，于是二极管散弹噪声电流的功率谱密度为

$$\begin{aligned} S_i(f) &= S_{i_1}(f) + S_{i_2}(f) = 2qI_1 + 2qI_2 \\ &= 2qI_0[\exp(qV/kT) + 1] \\ &= 2q(I + 2I_0) \\ &= 2kTg_0 \left( \frac{I + 2I_0}{I + I_0} \right) \end{aligned} \quad (1.17)$$

其中,  $g_0$  为二极管的电导, 可以表示为

$$g_0 = \frac{dI}{dV} = \frac{q(I + I_0)}{kT} \quad (1.18)$$

当结零偏时,  $I=0$ , 有

$$S_I(f) = 4qI_0 = 4kTg_0 \quad (1.19)$$

这时的散弹噪声在数值上等于器件电导的热噪声。当结正偏时,  $I > I_0$ , 则有

$$S_I(f) = 2qI = 2kTg_0 \quad (1.20)$$

这时的散弹噪声在数值上等于器件电导的热噪声的一半。当结反偏时,  $I = -I_0$ , 则有

$$S_I(f) = 2qI_0 \quad (1.21)$$

显然, 反偏时的散弹噪声远小于正偏时的散弹噪声。由 (1.19), (1.20) 和 (1.21) 可以看出, 和器件的热噪声一样, 半导体激光器的散弹噪声一般也很小。

在通常的频率范围内, 热噪声和散弹噪声的功率谱密度与频率无关, 属于白噪声, 与器件或材料的本质特征有关。

### 3. $1/f$ 噪声

凡是功率谱密度与频率成反比的随机涨落现象均可称为  $1/f$  噪声。在电子器件中  $1/f$  噪声的电压功率谱密度可以写成如下的形式

$$S_v(f) = AI^\beta / f^r \quad (1.22)$$

其中,  $I$  为通过器件的电流,  $f$  为频率, 参数  $A$  由器件结构等特性决定,  $r$  可取  $0.8 \sim 1.2$ , 对于均匀材料,  $\beta = 2.0$ 。

对  $1/f$  噪声的研究有两种物理模型, 一是表面载流子涨落模型, 二是迁移率涨落模型。表面载流子涨落模型认为半导体导带或价带的载流子通过隧道贯穿与表面氧化层中的陷阱相互作用是引起  $1/f$  噪声的主要原因<sup>[28]</sup>。主要用于解释器件的表面  $1/f$  噪声, 其大小在很大程度上取决于工作电流中表面成分的多少, 同时也与半导体-氧化物界面附近的几个纳米范围内的氧化层中陷阱浓度

有关。从这个意义上说, 1/f 噪声直接反映了器件表面质量及可靠性。在结型器件中, 氧化层陷阱电荷的涨落通过调制表面复合速度, 引起表面少数载流子数目的涨落, 从而导致少数载流子电流的涨落。形成表面 1/f 噪声。迁移率涨落模型是胡格从经验公式出发提出来的, 该模型所描述的 1/f 噪声是一种体效应, 而且对于不同结构的器件, 胡格系数应具有相同的值<sup>[29]</sup>。但对于各种结型器件的测量结果表明, 胡格系数并不是一个普适常数。原因可能是器件的表面 1/f 噪声掩盖了体 1/f 噪声, 也可能是不同的器件造成迁移率的散射机构不同。通常, 表面载流子涨落和迁移率涨落这两种机构同时存在。在大多数情况下, 只有通过改变器件结构或表面状况, 使表面载流子涨落引起的 1/f 噪声降低到可以忽略的程度以后, 这时迁移率涨落才成为 1/f 噪声的主导机构。

器件中的 1/f 噪声分为本征 1/f 噪声和非本征 1/f 噪声两类。位于空间电荷区, 表面氧化层等处的陷阱中心对载流子的随机俘获和发射, 将引起器件中载流子数的涨落, 从而产生 1/f 噪声。在可比条件下, 这种 1/f 噪声的大小取决于陷阱密度的多少, 随着陷阱密度的不同, 可以在一个较大范围内变化, 而且从本质上看是完全可以消除的, 故称为非本征 1/f 噪声。各种散射过程的随机性将引起材料或器件的中的迁移率涨落, 也会产生 1/f 噪声。对于不同类型的材料或不同结构的器件, 这种 1/f 噪声具有大体相同的强度, 而且从本质上看是不能消除的, 故称为本征 1/f 噪声。只有将非本征 1/f 噪声降低到可以忽略的程度, 本征 1/f 噪声才会成为器件 1/f 噪声的主导机构。

半导体激光器中的 1/f 噪声可以表示为<sup>[8]</sup>

$$S_{V1/f} = \left( \frac{mkT}{qI_L} + R_s \right)^2 \left[ \left( \frac{2}{3} \alpha \frac{qI_L}{f\tau_n} \right) + q^2 S_{E_{vc-1/f}} + q^2 \frac{\langle \Delta S^2 \rangle_{1/f}}{\tau_c} \right] + \frac{\alpha}{Nf} R_s^2 I_L^2 \quad (1.23)$$

式中,  $m$  是理想因子,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $q$  是电子电量,  $\alpha$  是胡格系数,  $\tau_n$  是电子的寿命,  $\tau_c$  是光子的寿命,  $T$  是绝对温度,  $R_s$  是器件的串联电阻,  $N$  是通过欧姆接触层的载流子的平均数,  $I_L$  是注入电流,  $f$  是频率。  $S_{E_{vc-1/f}}$  和  $\langle \Delta S^2 \rangle_{1/f}$  分别代表增益(吸收)系数涨落和光子产生或复合速率涨落引入的 1/f 噪声。由式(1.23)可以看出, 半导体激光器中的 1/f 噪声可分为四部分: 一是由扩散电流的涨落引起的, 在自发发射区占主导地位。二是由增益(吸收)系数涨落引起的, 在阈值附近的区域是主要的。三是由光子数涨落引起的, 在激光区占主导地位。四是由串联电阻的涨落引起的。当其他 1/f 噪声源引起的噪声较

大时，串联电阻引起的噪声可以忽略，所以一般情况下，半导体激光器的  $1/f$  噪声不与电流的平方成比例；当其他  $1/f$  噪声源引起的噪声较小而串联电阻对噪声的贡献较大时，器件的噪声才与电流的平方成比例。

#### 4. g-r 噪声

在半导体材料或器件中，存在着能够发射或俘获载流子的各种杂质中心。根据他们在禁带中能级位置的不同，分别起着受主中心、施主中心、陷阱中心或产生-复合中心的作用。这些杂质中心对载流子的发射和俘获是一种随机事件，因此占据其能级的载流子数目随机涨落，同时引起导带电子或价带空穴的随机变化，由此产生的噪声称为产生-复合噪声 (Generation-recombination noise)。分析表明只有能量在费米能级附近几个  $kT$  范围的杂质中心才对 g-r 噪声有明显贡献，g-r 噪声的主要来源是位于禁带中部的深能级产生-复合中心和陷阱中心<sup>[30,31]</sup>。半导体激光器的 g-r 噪声主要来源于晶格失配以及表面解理和腐蚀而引入的非辐射复合中心。g-r 噪声反映了器件内部陷阱中心的存在。

设有  $N$  个 g-r 噪声源，则 g-r 噪声的表达式为

$$S_{g-r}(f) = \sum_{i=1}^N \frac{4f_i(1-f_i)\tau_i}{1+\omega^2\tau_i^2} \quad (1.24)$$

$f_i$  为缺陷能级被载流子占据的几率， $\tau_i$  为缺陷能级的时间常数，与 g-r 噪声的转折频率  $f_{0i}$  有下面的关系

$$\tau_i = \frac{1}{2\pi f_{0i}} \quad (1.25)$$

又  $\omega = 2\pi f$ ，并令  $C_i = \frac{4f_i(1-f_i)}{2\pi}$  则 (1.24) 可以表示为

$$S_{g-r}(f) = \sum_{i=1}^N C_i \frac{1/f_{0i}}{1+(f/f_{0i})^2} \quad (1.26)$$

#### 1.3.3 半导体激光器 (LD) 的噪声等效电路

LD 的速率方程可以写为：

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{q} - \frac{N}{\tau_s} - (E_{cv} - E_{vc})S + f_N \quad (1.27)$$

$$\frac{dS}{dt} = (E_{cv} - E_{vc})S + \beta \frac{N}{\tau_s} - \frac{S}{\tau_{ph}} + f_S \quad (1.28)$$

其中  $N, S$  分别是有源区内电子和光子数。  $i$  是注入电流，  $q$  是电子的电量，  $\tau_s$  是自发射寿命，  $\tau_{ph}$  是光子寿命，  $E_{cv}S$  是受激发射速率，  $E_{vc}S$  是受激吸收速率。 定义  $g = E_{cv} - E_{vc}$  为激光器的增益，  $f_N$  和  $f_S$  分别是与电子和光子有关的 Langevin 噪声源， 并假设  $f_N$  和  $f_S$  具有散弹噪声特性。

由该速率方程可得到单模 LD 的等效电路如图 1-7 所示<sup>[17,32]</sup>：

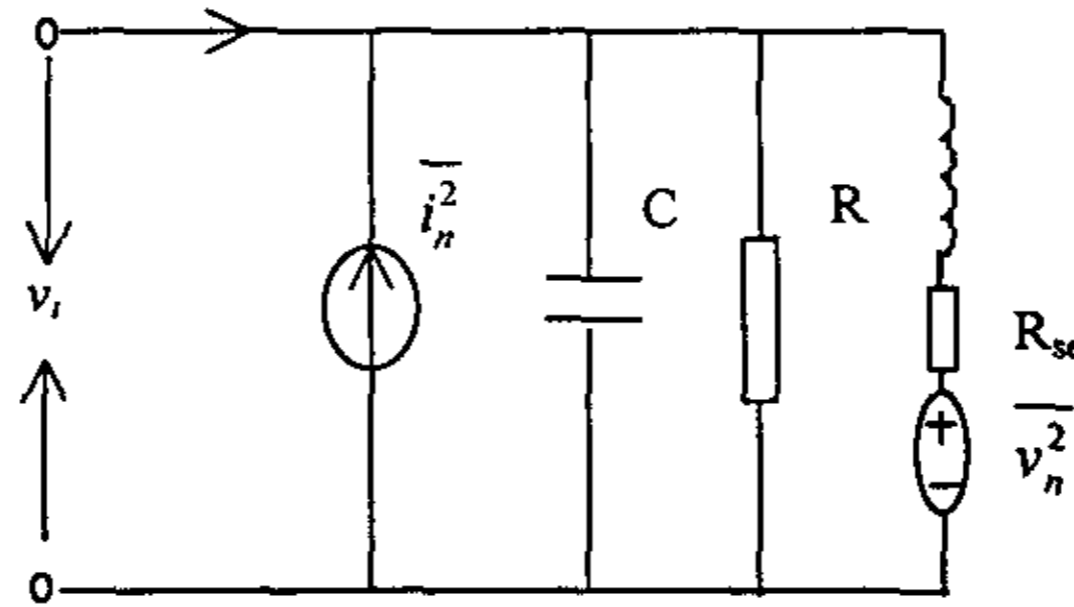


图 1-7.单模 LD 噪声等效电路

其中，  $C$  是由于注入载流子的存贮效应而产生的扩散电容，  $R$  是二极管的微分电阻，  $L$  是与辐射光子有关的微分电感，  $R_{sc}$  是与自发发射耦合进入激光模式有关的电阻，  $\overline{i_n^2}$  代表与电子涨落有关的噪声电流源，  $\overline{v_n^2}$  是由于光增益涨落而产生的噪声电压源。

由该等效电路可得电压噪声的谱密度为：

$$S_v(f) = \frac{\overline{v_i^2(\omega)}}{\Delta f} = \frac{[R_{sc}^2 + (\omega l)^2] \overline{i_n^2} + \overline{v_n^2} + 2\overline{i_n v_n} R_{sc}}{(LC)^2 D(\omega) D^*(\omega)} \cdot \frac{1}{\Delta f} \quad (1.29)$$

$$D(\omega) = -\omega^2 + j\omega \left[ \frac{R_{sc}}{L} + \frac{1}{RC} \right] + \frac{1}{LC} \left[ 1 + \frac{R_{sc}}{R} \right] \quad (1.30)$$

二极管的阻抗为：

$$Z(\omega) = \frac{v_i(\omega)}{i(\omega)} = \frac{1}{LC} \left[ \frac{R_{se} + j\omega L}{D(\omega)} \right] \quad (1.31)$$

在低频时，电压噪声的谱密度可简化为，

$$S_v(f) = \frac{R_{se}^2 \overline{i_n^2} + \overline{v_n^2} + 2\overline{i_n v_n} R_{se}}{\left(1 + \frac{R_{se}}{R}\right)} \cdot \frac{1}{\Delta f} \quad (1.32)$$

对于多模 LD，每个模式可以用一个并联支路来表示，噪声的等效电路如图 1-8 所示<sup>[17, 18, 32]</sup>：

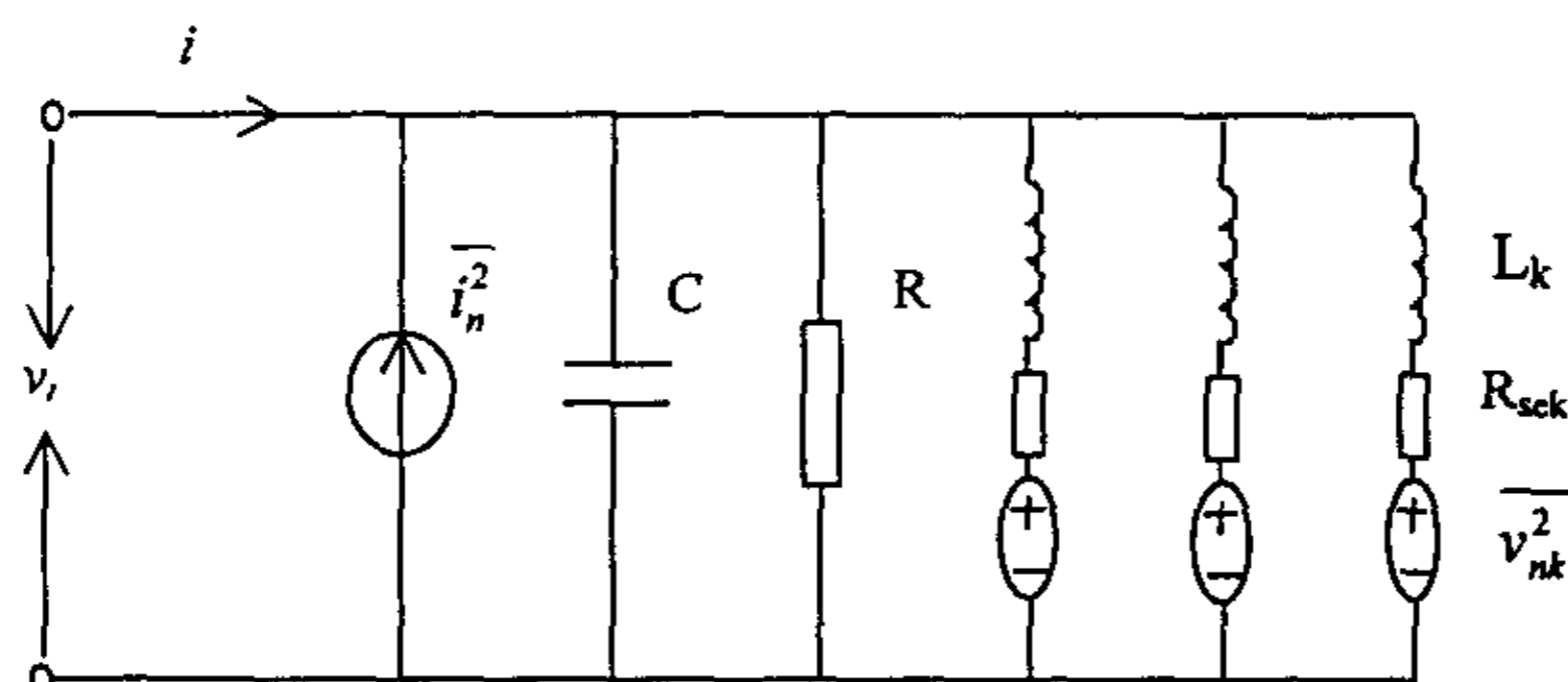


图 1-8 多模 LD 的噪声等效电路

其电压噪声的谱密度为：

$$S_v(f) = \frac{|Z_{eq}|^2}{\Delta f} \cdot \left[ \overline{i_n^2} + \sum \frac{\overline{v_{nk}^2}}{R_{sck}^2 + L_k^2 \omega^2} + 2 \sum_{k=1}^m \operatorname{Re} \left( \frac{\overline{i_n v_n^*}}{R_{sck} + jL_k \omega} \right) \right] \quad (1.33)$$

考虑 LD 的寄生参量后，LD 的端电压噪声的谱密度表示为<sup>[8]</sup>：

$$TEN(f) = S_v(f) \cdot G(f) \quad (1.35)$$

$G(f)$ 是与寄生参量有关的寄生传递函数。

根据 (1.32) 和 (1.35) 式可得到 TEN 与频率和注入电流间的关系曲线，分别如图 1-9, 10 所示，A, B 代表不同的注入电流，C, D 代表不同的频率。

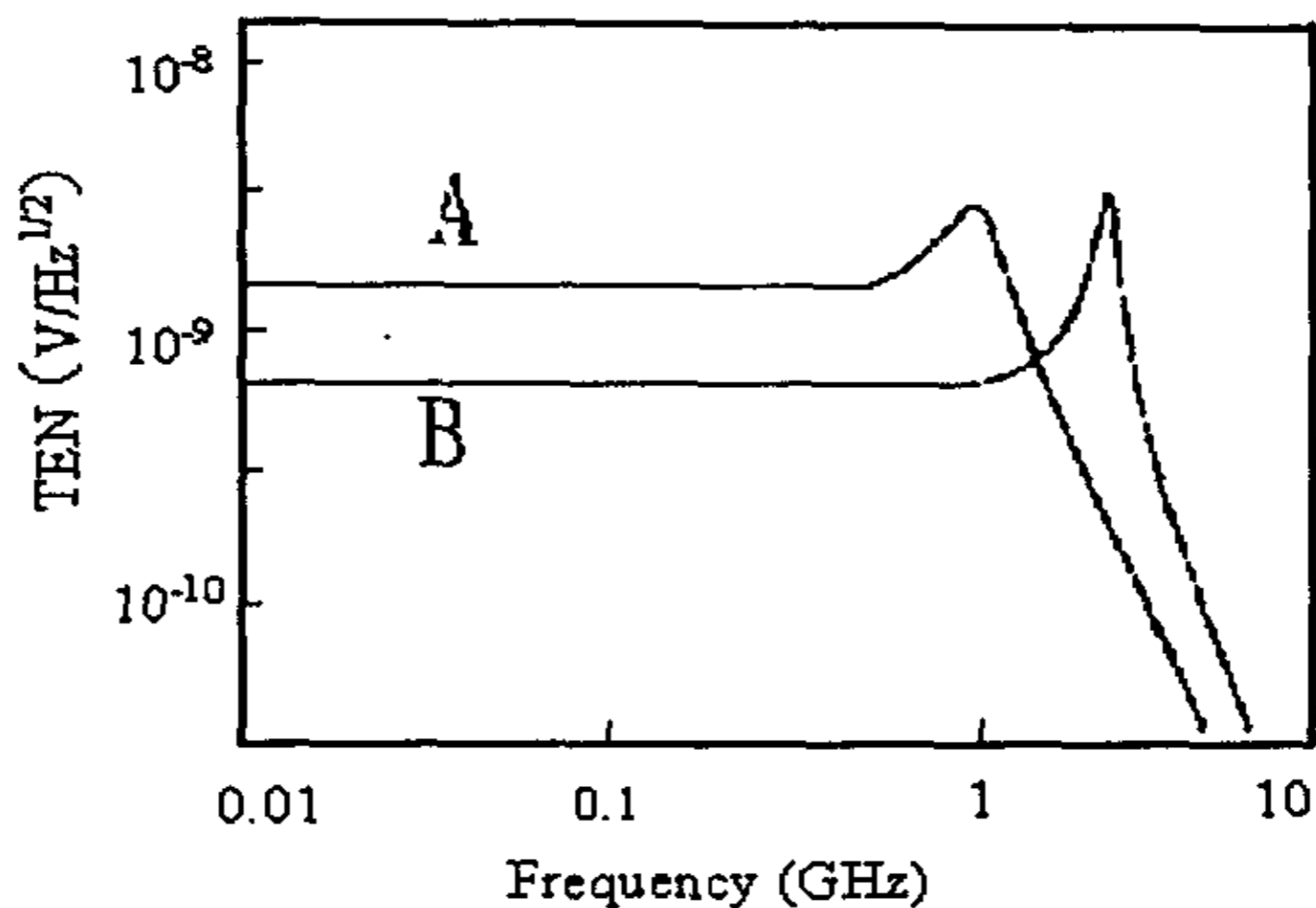


图 1-9. TEN 与频率的关系曲线

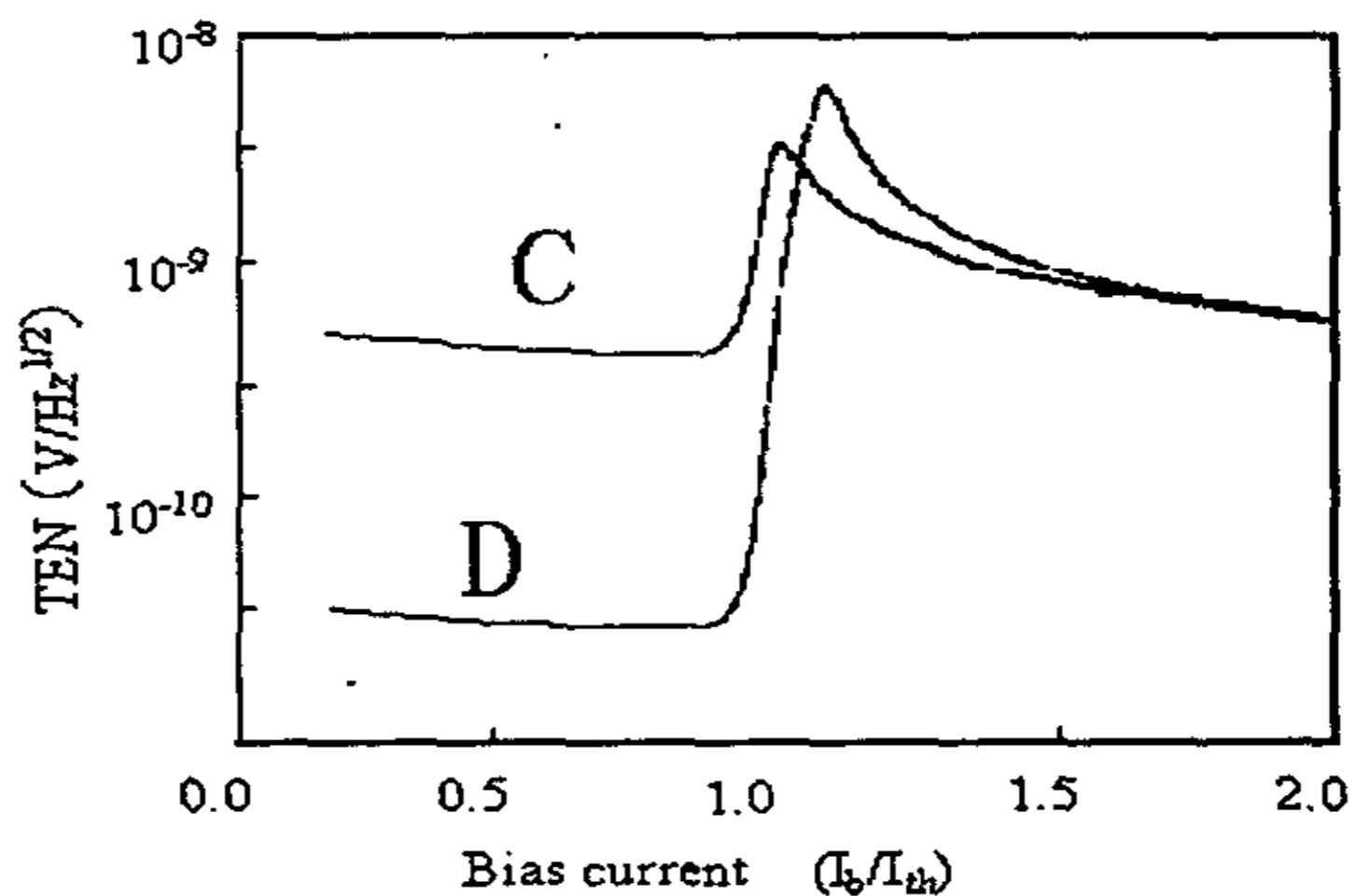


图 1-10 TEN 与注入电流的关系

### 1.3.4 电噪声的应用

#### 1. 电噪声用于测量激光器阈值电流和弛豫振荡频率

阈值电流和弛豫频率是激光器的两个重要参数，前者是激光器产生激光的最小注入电流，在实际应用中要根据阈值的大小来确定激光器的工作电流和预偏置电流。而后者是光噪声最大值所对应的频率。由图 1-9 和图 1-10 可知，在 TEN 与频率 ( $f$ ) 和偏置电流 ( $I/I_{th}$ ) 的关系曲线中各有一个噪声峰，分别

对应激光器的弛豫频率和阈值电流。我们可以通过实验测出 TEN 随频率和注入电流的变化情况，其最大值所对应的频率和注入电流分别就是 LD 的弛豫振荡频率和阈值电流。

## 2. 电噪声用于激光器的谱线宽度的监测

激光器频率噪声的谱密度与 TEN 间有如下的关系<sup>[13, 14]</sup>：

$$S_{\nu}(\omega) = \left( \frac{v_g \Gamma A N_0 q}{2mkT} \right)^2 [\alpha^2 TEN(\omega) + TEN_{LF}] \quad (1.36)$$

$v_g$  是群速度， $\Gamma$  是光限制因子， $A$  是常数。 $N_0$  是稳态时有源区内的载流子数。 $m$  是理想因子， $k$  是玻尔兹曼常数， $T$  是绝对温度。 $TEN_{LF}$  代表 TEN 中的低频成分。

由 (1.7)，(1.8)，(1.9)，(1.36) 得<sup>[14]</sup>：

$$\Delta\nu_{1/2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{v_g \Gamma A N_0 q}{2mkT} \right)^2 \cdot TEN_{LF} (1 + \alpha^2) \quad (1.37)$$

其中  $\alpha$  是线宽增强因子。由 (1.37) 可知，通过测量 TEN 的大小可以确定谱线的宽度。这为在线监测 LD 的谱线宽度提供了一个简单的新方法。

## 3. 低频电噪声用于监测模式跳变<sup>[15, 18, 19]</sup>

设  $E_i$  ( $i=1, 2$ ) 代表相邻两个模式的电场强度，则有

$$\frac{dE_i}{d\tau} = (a_i - |E_i|^2 - \xi |E_j|^2) + q_i(\tau) \quad (i, j = 1, 2, \quad i \neq j) \quad (1.38)$$

$\tau$  是归一化的载流子的弛豫时间， $a_i$  是与注入电流及温度有关的泵浦系数， $\xi$  为模式耦合系数， $q_i$  是与自发发射涨落有关的 Langevin 噪声项。在自发发射涨落的触发下，改变注入电流和温度，使之满足：

$$\frac{1}{\xi} < \frac{a_1}{a_2} < \xi \quad (1.39)$$

这时激光器会出现模式跳变现象。当一个模式向其临近模式跳变时，将导致模式竞争，使增益介质中的载流子的密度出现涨落，进而使 TEN 发生变化。通过测量 TEN 随注入电流的变化情况及其功率谱的形状，可以在线监测激光器

是否出现模式跳变。当模式跳变出现时, TEN 随注入电流变化的关系曲线中有峰出现<sup>[15]</sup>, 其功率谱为 Lorentzian 形式, 即在低频段有较高的白噪声<sup>[18, 19]</sup>。

#### 4. 电噪声对激光器可靠性进行估计

器件内部存在缺陷, 表面漏电, 腔面状况不好, 界面或 pn 结周围状态不理想, 欧姆接触不好等因素都是器件电噪声的重要来源, 将带来过剩的  $1/f$  或  $g-r$  噪声。而上述这些因素都与器件的质量密切相关。所以, 器件电噪声大小反映了器件的不完善, 可以对器件的质量和可靠性作出评价<sup>[2-7]</sup>。

通过对不同结构器件的寿命实验和噪声测试表明, 长寿命器件都是初始噪声小的器件, 而初始噪声大的器件在老化过程中, 都表现为快退化<sup>[4, 5, 7]</sup>。初始噪声大的器件或者是器件内部缺陷较多, 或者其表面界面状态不好, 或者是有并联漏电回路存在, 这些因素都使器件阈值电流升高, 输出光功率下降, 导致器件快退化, 寿命较短。但对 808nm 远结激光器的测试却没有得到类似的结果, 噪声大的器件在老化后也可能是长寿命器件<sup>[33]</sup>。与通常的激光器不同, 远结激光器的有源区与 pn 结分开, 可移动缺陷可以在 pn 结电场的吸引下, 移向 pn 结, 而使有源区内的缺陷减小。如果远结激光器的高噪声主要是由可移动缺陷引起的, 那么这些移动缺陷在老化过程中将移向 pn 结, 使有源区内的非辐射复合中心减少, 器件退化较慢, 寿命较长。

## § 1.4 本论文的主要工作

论文期间主要开展了以下几个方面的工作:

1. 首次开展了噪声与器件表面状况的相关性研究。讨论了器件表面状况改变对噪声的影响。分别对器件表面进行钝化、HF 腐蚀、 $\text{Na}^+$  沾污处理, 观测了表面处理前后的噪声变化和 V-I 特性变化。腔面处理后, 器件噪声和器件在小注入下的 V-I 特性变化明显。这表明器件在小注入下噪声大小在很大程度上取决于电流中的表面成分多少, 与表面状况密切相关, 可以用来评价器件表面的质量及可靠性, 是一种快捷、方便、无损的新方法。首次讨论了器件在小注入下噪声与器件表面复合电流的相关性。在不同条件下, 观测了器件噪声和表面复合电流的变化情况, 结果表明器件噪声与表面复合电流有着相同的变化趋

势。

2.首次将器件在小注入 ( $I=20\mu\text{A}$ , 器件处于未导通状态) 下的噪声引入半导体激光器的可靠性筛选, 提高了筛选的准确率。制约器件可靠性的一个重要因素就是器件表面状况的好坏, 表面缺陷、位错或表面态较多, 导致表面复合加强, 产生局部加热使腔面退化, 进而使器件退化。有源区内存在缺陷, pn 结周围界面不完善, 也是器件缩短寿命的重要原因。欧姆层、波导层、包层的质量不好也将严重影响器件的可靠性。而这些因素都是器件噪声的重要来源, 其中表面状况好坏和有源区缺陷的多少与小注入下的噪声 ( $S_{v1}$ ) 有关, 欧姆层, 波导层, 包层的不完善和后工艺不理想与较高注入下的噪声 ( $S_{v2}$ ) 有关。所以, 噪声用于器件可靠性筛选时, 既应考虑  $S_{v1}$  也应考虑  $S_{v2}$ 。而在以前的研究中却只考虑了  $S_{v2}$ 。我们把  $S_{v1}$  和  $S_{v2}$  同时引入器件的可靠性筛选。70 余只器件的噪声测试和老化结果表明, 把器件在小注入下的噪声大小作为器件可靠性筛选的判据之一, 提高了筛选的准确率。

3.首次将小波分析引入噪声信号分析和器件可靠性评价。小波变换具有空间局部化性质, 能同时在时频域中对信号进行分析, 它能有效地区分信号的突变部分和噪声, 在分析信号的奇异性和确定奇异点位置方面有着 Fourier 变换无法比拟的优势。我们利用小波变换对半导体激光器噪声信号中的白噪声进行了消噪处理, 有效地提取了噪声信号中的  $1/f$  成分, 而正是  $1/f$  噪声反映了材料或器件的不完整性, 与器件质量密切相关。另外, 我们用小波变换对不同器件的噪声信号进行了多分辨率分析, 确定信号趋势, 用以评价器件的质量和可靠性。我们也应用小波变换对 g-r 噪声的转换频率进行了准确定位, 取得了满意效果。

4.建立了半导体激光器噪声测试系统。研究了系统的屏蔽和接地技术, 采用了多层屏蔽和浮地技术, 最大限度地减少空间电磁干扰和接地干扰, 整个系统的本底噪声小于  $1nV/\sqrt{Hz}$ 。采用互谱技术后, 系统的本底噪声可以达到  $0.1nV/\sqrt{Hz}$ 。通过比较和分析, 选择电瓶作为激光器的驱动电源, 采用适当的滤波和分压技术, 使驱动电路既可以提供  $10\mu\text{A}$ - $600\text{mA}$  的宽范围驱动电流, 又有效地减少了驱动电流涨落对测试结果的影响, 取得了满意的效果。进一步分压后驱动电路可以提供  $10\mu\text{A}$  以下的驱动电流。

5.对器件噪声与器件质量间的相关性作了较全面的论述。测量并分析了腔

面状况、内部缺陷、串并联电路、界面退化、应力对器件噪声的影响。实验和理论相结合，分析了器件噪声的主要来源和产生机理。

6.运用可靠性的数学理论确定了噪声用于可靠性筛选的阈值判据。通过分析噪声的分布情况，根据概率理论，并与老化实验相结合，确定噪声判据阈值，然后对批量器件的可靠性进行筛选。这不仅为选择噪声判据阈值提供了理论依据，也提供了选择判据的一种新手段。

本文将噪声引入半导体激光器的质量表征和可靠性筛选，并做了一些探索性工作，取得了一些结果。但应该看到，半导体激光器的噪声研究是一个十分复杂的问题，许多工作还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] Tenchio G. Low-frequency Intensity Fluctuation of CW DH GaAlAs Diode Lasers. *Electronics letters*. 1976, 12(21), 562-56
- [2] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al. Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and device quality. *Proceeding of SPIE*. Vol.4220, 2000, 217-220.
- [3] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Shumei, Zhang Fenggang. Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and devices surface non-radiative current. *Microelectronics Reliab.* 已接收。
- [4] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al, Low-frequency electrical noise as reliability estimation for high-power semiconductor lasers. *Optical and Quantum electronics*, is accepted.
- [5] Shi Jiawei, Jin EnSun, Ma Jing et al. An Improved Approach and Experimental Results of A low-frequency Noise Measurement Technique used for Reliability Estimation of Diode Lasers. *Microelectron Reliab.*, 1994, 34(7), 1261-1264.
- [6] 胡贵军, 石家纬, 张素梅等. 激光器电噪声和非辐射复合电流的相关性. 2001, *半导体光电*, 22(1), 12-14.
- [7] 石家纬、金恩顺、马靖等, 半导体激光器的低频电噪声谱密度和器件的可靠性. *中国激光* 1993, A20(10), 729-732.
- [8] Orsal B, Sigaoret P, Peransin J.M, et al. Correlation between Electrical and optical photocurrent Noise in Semiconductor Laser Diode. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1994, 41(11) 2151-2161.
- [9] Sheng-Lyang Jong, Jim-Yat Wu. Low-frequency Current and Intensity Noise in AlGaAs Laser Diodes. *solide-state Electronics*. 1995, 36(2), 189-196

- [10] X.Y. Chen, A. Pedersen, O.G. Helleso et al. Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents. *Microelectronics Reliab.* 40(2000), 1925-1928.
- [11] J.Morgan, J.Horrison, S.R.Adods et al. low-frequency Electrical Noise characteristics of Broad Area 808nm semiconductor Laser Diodes. Conference proceeding Leos'97, 10th Annual meeting.
- [12] 胡贵军 石家伟 李红岩等. 808nm 大功率半导体激光器的低频电噪声. *吉林大学自然科学学报* 2000, NO.3, 58-60
- [13] P.A.Andrekson, P. Andersson, A. Alping et al. In situ characterization of laser Diodes from wide-Band Electrical Noise Measurements. *IEEE Journal of lightwave technology.*1986, LT-4 (7) , 804-811.
- [14] P.A.Andrekson, P.Andersson, and A. Alping. Linewidth determination from electrical noise measurements on semiconductor Lasers. *Electron.lett.* 1985, 21, 1097-1099.
- [15] P A Andrekson, P. Andersson, A .Alping. Electrical Noise Measurement on Laser Diodes for Monitoring of optical Feedback and Mode Hopping. *Electron.lett.* 1986, 22, 195-196.
- [16] Hu Guijun, Shi Jiawei, Qi Liyun et al. High-power Quantum Well Remote Junction Laser and Its Electrical Noise Characteristics. *Optical & Laser Technology*, 33(2001), 231-235.
- [17] B.Orsal, R. Alabedra, P.signoret et al. InGaAsP/InP Distribute Feedback lasers for long wavelength optical communication systems of  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  :Electrical and optical noise study. *Proceeding of SPIE Vol.1512*, 1991, 112-123.
- [18] B.Orsal, J.M.peransin, K.Daulasim et al. Noise of 980nm InGaAs/GaAs strained quantum well lasers and correlation with aging. *Proceeding of SPIE*, Vol.1856, 1993, 222-237.
- [19] B.Orsal, J. M. Peransin, P. Singnoret et al. Low frequency noise of a 980nm InGaAs/GaAs Strained quantum well laser. *Phys. III, France*, 3(1993), 1739-1749.
- [20] A.Dandridge and A.B.Tveten. Phase noise of single-mode lasers in interferometer systems. 1981, *Appl. Phys. Lett.* 39(7), 530-532
- [21] S.Piazzolla, P. Spano, M. Tamburrini. Characterization of phase noise in semiconductor lasers. 1982, *Appl. Phys. Lett.* 41(8), 695-696
- [22] B. Daino, P. Spano, A. Tamburrini et al. Phase noise and spectral line shape in

- semiconductor lasers. 1983, IEEE J. QE. QE-19(3), 266-270
- [23] M-C Amann and R Hakimi. Linewidth brodening by 1/f noise in wavelength-tunable laser diodes. 1997, Appl. Phys. Lett. 70(12), 1512-1514.
- [24] Jean-Luc Vey, Philippe Gallion. Semiclassical model of semiconductor laser noise and amplitude noise squeezing—part I: description and application to Fabry—Perot laser. 1997, IEEE J. QE. 33(11). 2097-2104.
- [25] Jean-Luc Vey, Philippe Gallion. Semiclassical model of semiconductor laser noise and amplitude noise squeezing—part II: application to complex laser bstructures. 1997, IEEE J. QE. 33(11). 2105--2110.
- [26] X.Y.Chen, A. Pedersen, A.D. van Rheenen. Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes. 2001, Microelectronics Reliab. 41, 105-110.
- [27] Rob J Rronen and L.K.J.Vanamme. Low-frequency intensity noise in semiconductor. 1988, IEEE J. QE. 24(5), 724-735
- [28] Mcwhorter A.L. Semiconductor surface physics. Philadelphia: Universssity of Pennsylvrnia Press, 1957.
- [29] Hooge. 1/f noise is no surface effect. 1969, Phys. Lett. A-29, 139
- [30] Yisong Dai and Hexin Chen. Current noise due to generatttttion and recombination of carriers in forward-biased p-n junctions. Solid-state Electronics. 1991, 34(3), 259-264.
- [31]戴逸松, 晶体管 pn 结缺陷形成的 g-r 噪声研究。半导体学报, 1989, 10(1), 47-54.
- [32] Christoph Harder, Joseph Katz, S.Margalit et al. Noise Equivalent circuit of a Semiconductor Laser Diodes. IEEE J. quantum electronics.1982, QE-18(3), 333-337.
- [33]Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al. High-power Quantum Well Remote Junction Laser and Its Electrical Noise Characteristics. Optical & Laser Technology, 2001, 33(4), 231-235.

## 第二章：半导体激光器噪声测量

### § 2.1 噪声的测量方法

#### 2.1.1 直接测量法

目前国内外对 LD 噪声的测量多采用前置放大器加频谱分析仪的方法，测量框图如下：



图 2-1 LD 噪声直接测量框图

由于 LD 的噪声（特别是光噪声）是相当弱的，一般在几十  $\text{nV}/\sqrt{\text{HZ}}$  的数量级，属于极微弱信号，所以这种测量方法要求低噪声前置放大器的等效输入噪声要足够小，一般要在  $\text{nV}/\sqrt{\text{HZ}}$  数量级。所以用这种方法测量 LD 噪声对放大器的要求比较严，放大器的噪声大小直接影响测量的准确性。目前商用的低噪声放大器已经做得相当好，如南京大学微弱信号检测中心研制的 ND-801 型低噪声前放，其电噪声  $< 2\text{nV}/\sqrt{\text{HZ}}$ ；而英国 EG&G 公司的 Model 5184 为  $0.8\text{nV}/\sqrt{\text{HZ}}$ ，但这些放大器的价格都是相当昂贵的，而且进一步降低放大器的噪声已非易事。

这种方法既可以测量电噪声也可以测量光噪声，可根据样品盒中的开关加以选择，其电路原理如图 2-2 所示。当开关 K 与 1 端闭合时，测量电噪声，与 2 端闭合时测量光噪声。

#### 2.1.2 互谱测量法

由于上述的直接测量法对前置放大器的噪声特性要求太严，戴逸松教授<sup>[1]</sup>提出了互谱测量方法，将待测噪声信号分两路送给前放，放大后，送到互谱估计器中计算并得到互功率谱，由于两个放大器的噪声和干扰互不相关，可以很好地消除由于前放噪声及零漂等因素带来的影响，保证了测量精度。

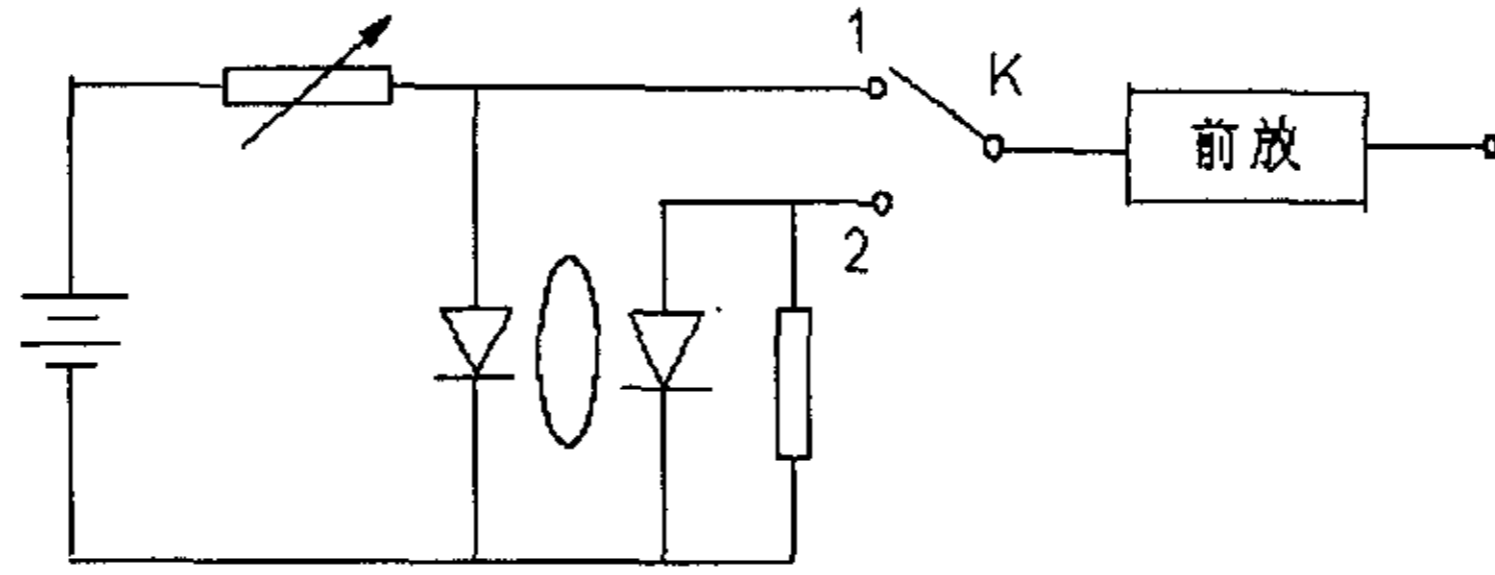


图 2-2 光电噪声测量转换

设被测信号为  $s(t)$ ，两个前置放大器 1 和 2 的等效输入噪声电压为  $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$  信号，则输出电压  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  为：

$$x_1(t) = \int h_1(t) [s(t-u) + n_1(t-u)] du \quad (2.1)$$

$$x_2(t) = \int h_2(t) [s(t-u) + n_2(t-u)] du \quad (2.2)$$

式中  $h_1(t)$  和  $h_2(t)$  分别是两个前置放大器的脉冲响应。 $x_1(t)$  与  $x_2(t)$  的互相关函数为

$$R_{x_1 x_2} = E[x_1(t)x_2(t-\tau)] \quad (2.3)$$

根据 Wiener-Khinchine 定理，互谱密度为

$$S_{x_1 x_2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_1 x_2}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.4)$$

由于  $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$  及  $s(t)$  之间不相关，把(2.1)，(2.2)，(2.3)带入(2.4)可以得到如下关于互谱密度的式子

$$S_{x_1 x_2}(\omega) = K_1(j\omega)K_2^*(j\omega)S_s(\omega) \quad (2.5)$$

式中： $K_1(j\omega)$  及  $K_2(j\omega)$  为两个放大器的增益。 $S_s(\omega)$  为噪声信号的功率谱。上式表明，噪声信号的功率谱密度可以通过对两个前置放大器的输出做互谱估计得到。并且前置放大器的噪声得到抑制，亦即干扰噪声影响可以消除。

由频谱仪测量得到信号的互功率谱，根据式(2.5)可得到被测信号的功率谱。用这种方法进行测量，可以使测量装置的本底噪声小一个数量级，例如，我们对 Max412 组成的放大器进行测量对比，单个放大器的本底噪声如图 2-3 中 A 曲线所示，采用互谱测量后，装置的本底噪声如图 2-3 中 B 曲线所示。可见互谱测量大大减小了装置的本底噪声，因此这种方法减少了对前置放大器

的要求，提高了测量的准确性。其中互谱估计器可以由频谱仪提供，一般的频谱仪都具有互谱功能，如日本小野测器生产的 CF-920，日本 ADVANTEST 公司的 R9211c，惠普公司生产的 HP35670A。

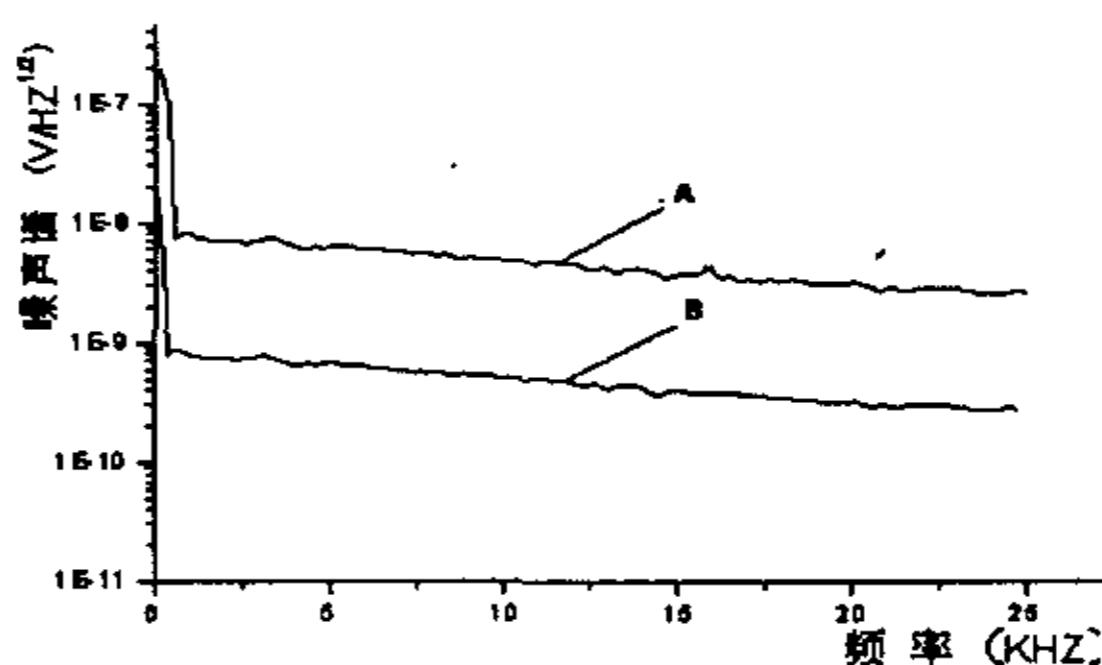


图 2-3 互谱前后装置本底噪声对比

互谱测量法的测量框图如图 2-4 所示：

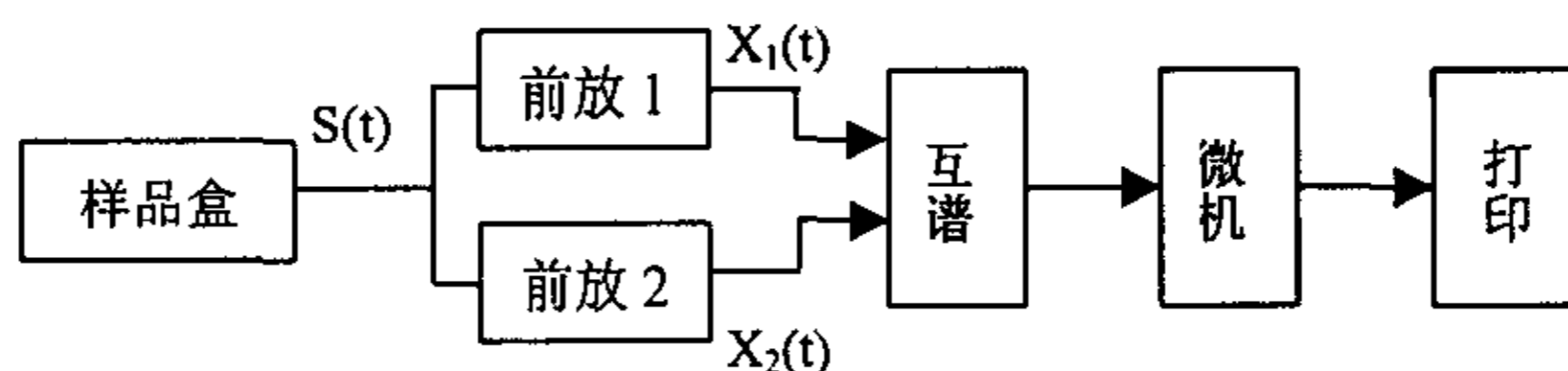


图 2-4 互谱测量原理框图

### 2.1.3 基于 PC 机的数字测量法<sup>[2]</sup>

随着计算机技术的迅猛发展，原来一些需要由硬件完成的任务，可以通过软件来实现，如数字滤波，快速傅里叶变换 (FFT) 以及曲线拟合等，因此可以充分利用微机的运算速度及存贮能力，实现对半导体激光的噪声信号的数字化处理，测量框图如图 2-5 所示：

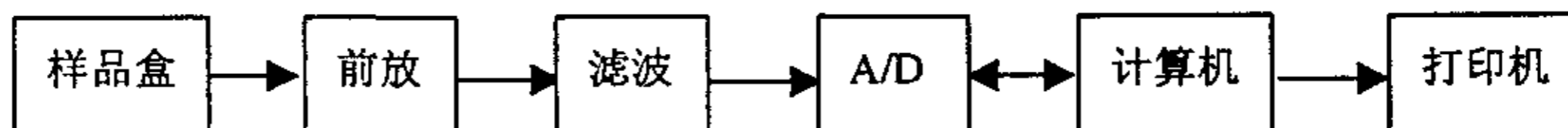


图 2-5 基于 PC 机的数字测量法框图

噪声信号经放大滤波后由 A/D 变换电路变成数字信号，然后再送给计算

机进行数字化处理,主要是进行数字滤波和 FFT 变换。把前放、滤波、A/D 三部分做在一个屏蔽盒内,而由 A/D 输出的数字信号经屏蔽电缆送至计算机的串口或并口。为进一步减小外界干扰的影响,可采用光缆进行传送。这种测量方法,由于测量前端将模拟信号转换成了数字信号,可以减少信号在传送过程中引入的干扰。它的最大特点就是省去了频谱分析仪,而由软件实现 FFT 变换,这也给测量带来了很大的灵活性,使得所测噪声信号的频率范围不再受频谱仪带宽的限制。如果再与互谱测量相结合,就具有互谱测量和数字处理的双重优点。其不足在于 A/D 转换将带来量化误差,提高 A/D 转换精确度可使量化误差减小。另外 A/D 转换速度以及刻度定标也会带来一定的误差。

#### 2.1.4 多通道测量法

在研究半导体激光器噪声中,有时需要进行噪声与波长间的相关性研究<sup>[3, 4]</sup>,这时就需要把 LD 产生的光信号分成若干波长,对每个波长的噪声进行测量分析,这时用多通道测量法就比较方便,这种测量方法的组成框图如图 2-6 所示:

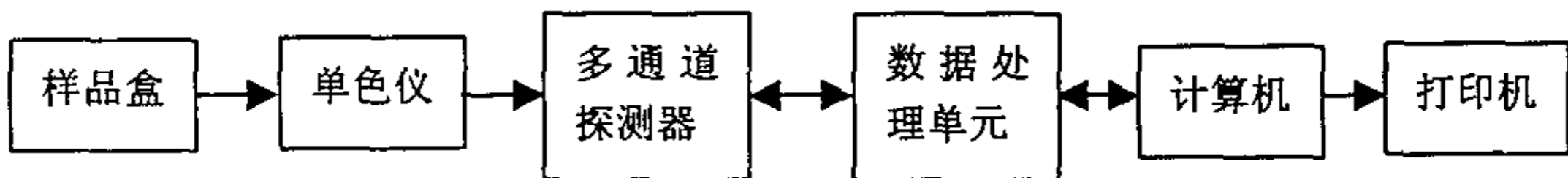


图 2-6 多通道测量原理框图

样品盒中的 LD 产生的光信号首先经单色仪分成不同的波长,然后送到多通道探测器,每个通道探测到某一波长的光信号,再由数据处理器和计算机进行数据处理。其中的每个通道的数据存贮时间、系统的采样频率和扫描的通道数具有一一对应关系,例如: Shiyuan Yang 等人报导的多通道测量系统<sup>[3]</sup>,其多通道传感器具有 256 个传感器,即最多提供 256 个通道,每个通道的扫描时间为 20  $\mu$ s/ch,其最大扫描频率则为 10KHz,则存贮时间、采样频率和扫描通道数如表 2-1 所示。

表 2-1:存贮时间、采样频率和扫描通道的对应关系

存贮时间	多样频率	扫描的通道数
100 $\mu$ s	10KHz	4ch
200 $\mu$ s	5KHz	9ch
500 $\mu$ s	2KHz	24ch
1ms	1KHz	49ch
2ms	500Hz	99ch
10 ms	100Hz	256ch

### 2.1.5 干涉测量法

半导体激光器的光噪声主要包括强度噪声和相位噪声。对于相位噪声的测量需用干涉测量法<sup>[5-8]</sup>，干涉测量法有非平衡测量法和平衡测量法。

#### 1.非平衡测量法

该方法的测量框图如图 2-7 所示：

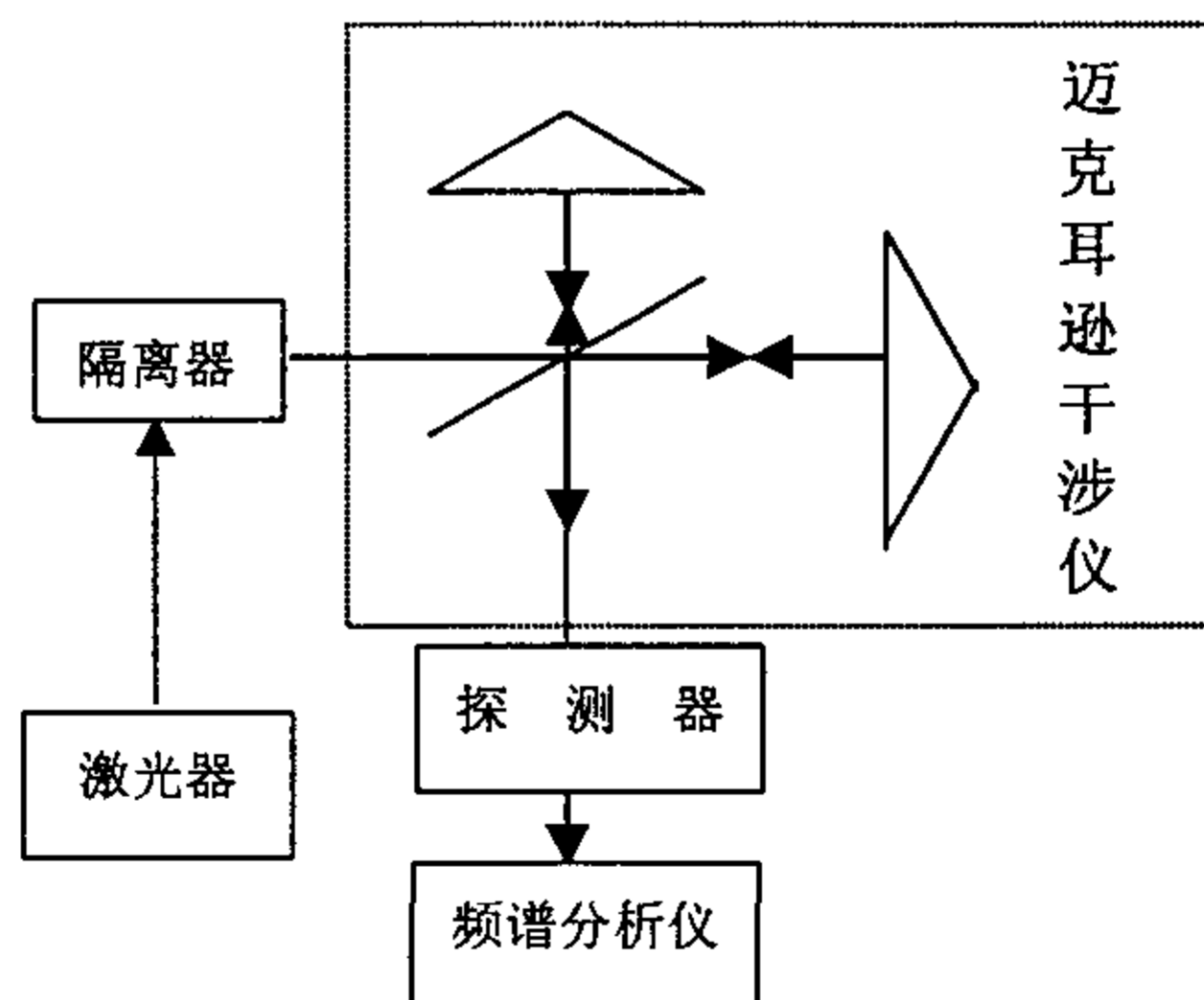


图 2-7 非平衡测量法原理框图

在该测量装置中，做为鉴频器的迈克耳逊干涉仪是核心部件，它将激光器输出光信号的相位噪声转化为强度噪声，然后由探测器转换成光电流，最后由频谱分析仪进行测量分析。光电检测器输出的光电流的功率谱密度  $S_i(\omega)$

与相位噪声的功率谱密度  $S_{\phi}(\omega)$  具有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$\frac{2S_{\phi}(\omega)}{\omega^2(1-\cos\omega\tau)} = \frac{S_i(\omega)}{i_1^2 R/4} \quad (2.5)$$

其中  $\omega$  为光信号的角频率,  $\tau$  经过干涉仪两臂的两束光信号的时延差,  $i_1$  为光电流的最大值,  $R$  为频谱分析仪的输入阻抗。由 (2.5) 式可知, 由频谱分析仪测得光电流的功率谱密度  $S_i(\omega)$ , 便可得到相位噪声的功率谱密度  $S_{\phi}(\omega)$ 。

对于非平衡探测法, 当被探测的频率噪声远大于强度噪声时, 探测结果是很精确的。相反, 若激光的强度噪声比较大时, 非平衡探测的精确性较差, 这时, 需要用平衡探测法。

## 2. 平衡探测法

这种测量方法的测量框图如图 2-8 所示。

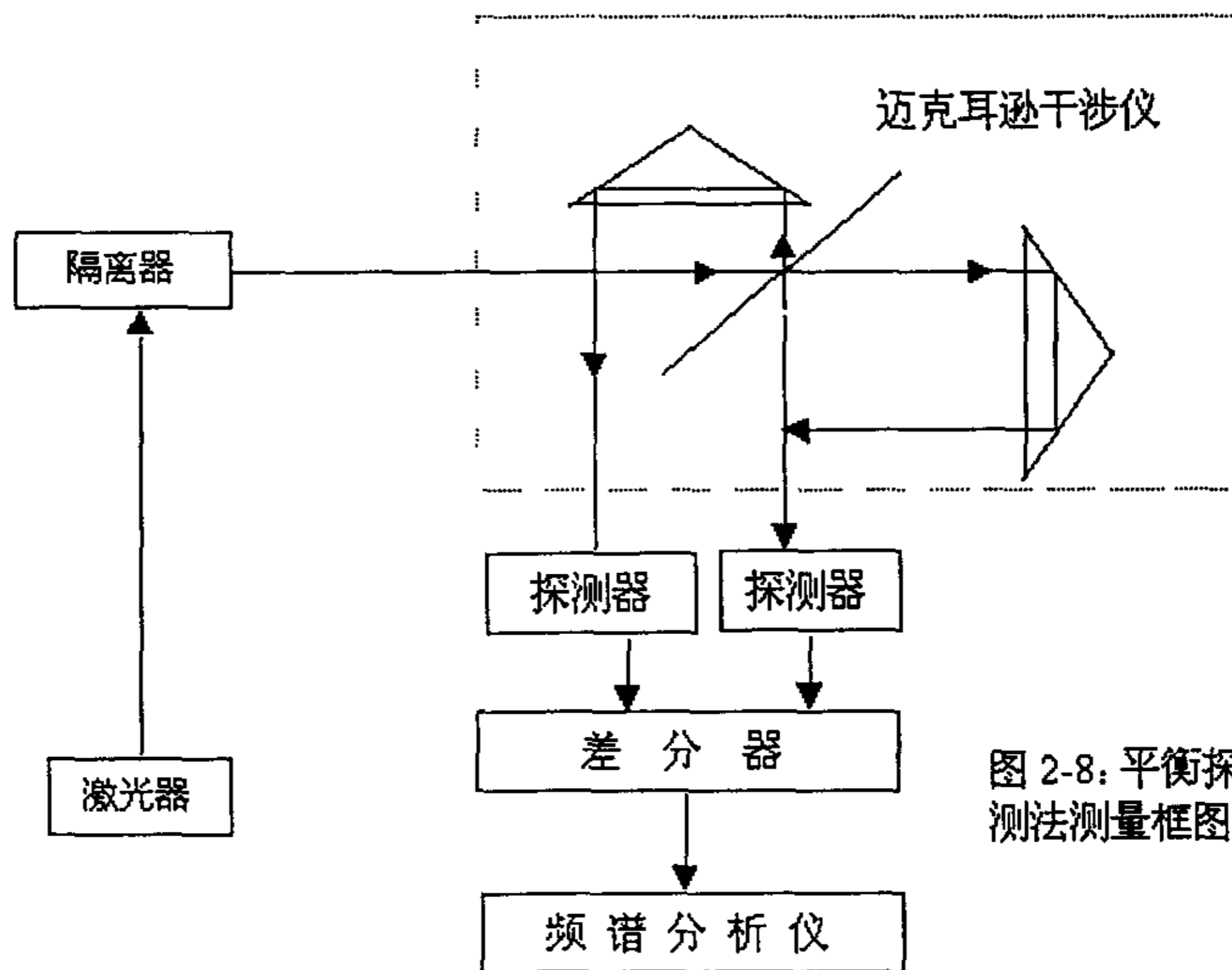


图 2-8: 平衡探测法测量框图

在该测量方法中分别用两个光电检测器对两束光进行检测, 然后将两路光电流相减, 得到两路光电流之差记  $I_{\text{diff}}$ 。由频谱仪测得  $I_{\text{diff}}$  的功率谱密度  $S_{I_{\text{diff}}}(\omega)$

便可得到相位噪声的功率谱密度  $S_{\phi}(\omega)$ <sup>[8]</sup>。平衡探测法的优点就在于在探测相位噪声时不受强度噪声的影响。

## § 2.2 噪声测试系统

### 2.2.1 测试系统的硬件构成

图 2-9 给出了 LD 噪声测试系统的组成框图。待测样品（激光器）置于样品室中，其 pn 节两端的电压涨落（噪声）由低噪声放大器放大后，送到频谱分析仪进行分析，并将测得的数据存盘，然后由微机对数据进行处理。在测试系统中，低噪声放大器采用的是 EG&G 公司生产的 Model 5184 放大器，其本底噪声为  $0.8\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。频谱分析仪是日本 ADVANTEST 公司的 R9211c，可测频率范围为 0—100KHz，能对所测数据进行存储和打印，具有互谱功能。当所测器件的噪声较大时，采用直接测量法，图 2-9 中的开关 K 断开。当所测器件噪声较小  $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  时，采用互谱测量法，开关 K 闭合。

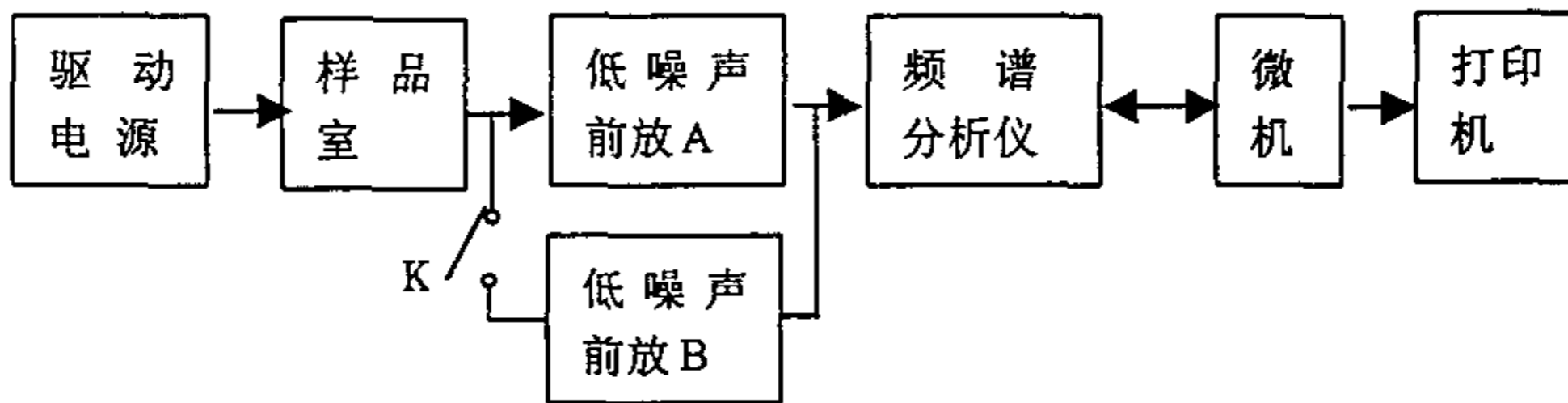


图 2-9 LD 噪声测试系统组成框图

### 2.2.2 测试系统中的抗干扰技术

#### 1. 驱动电源的选择

由于 LD 的噪声很小，且易受驱动电源输出电流涨落的影响，所以对 LD 进行噪声测试时，一般选择干电池作为驱动电源<sup>[9-11]</sup>。然而，对大功率 LD 进行噪声测试时，就不能选择干电池作为驱动电源，因为大功率 LD 是在大注入条件下工作，需要较大的驱动电流，一般要在几百 mA 以上，显然这对普通干电池是不能胜任的。而通常的直流稳压电源虽能满足大电流的要求，但用其作驱动电源时，会额外引入工频 50Hz 电场及其倍频分量，使 LD 噪声测试结果不准确。为此，我们选用大容量电瓶（1A 电流下可连续工作 7 小时）作为 LD 的驱动电源。它可以满足大输出电流和低噪声的双重要求。

## 2.空间电磁场干扰的抑制

空间电磁场或附近电力线的电场可能对被测信号和前置放大器的输入线产生干扰，即电力线通过空间电容耦合传送干扰。为克服这种干扰，一方面要对被测样品进行很好地屏蔽，另一方面要采用合理的接地方式。我们对被测样品（半导体激光器）进行了三重屏蔽，很好地抑制了外界干扰对测量结果的影响。屏蔽示意图如图 2-10 所示。在我们的设计中，被测样品和样品的驱动电路都被屏蔽在样品室中，其中驱动电路可以提供  $10\mu\text{A}$ — $600\text{mA}$  的宽范围的驱动电流。进一步分压，可以提供小于  $10\mu\text{A}$  的驱动电流。为避免电磁干扰电流在输入电缆线外皮上产生电压干扰，从而再通过电容耦合到内部，采用多点接地方式，如图 2-11 所示。

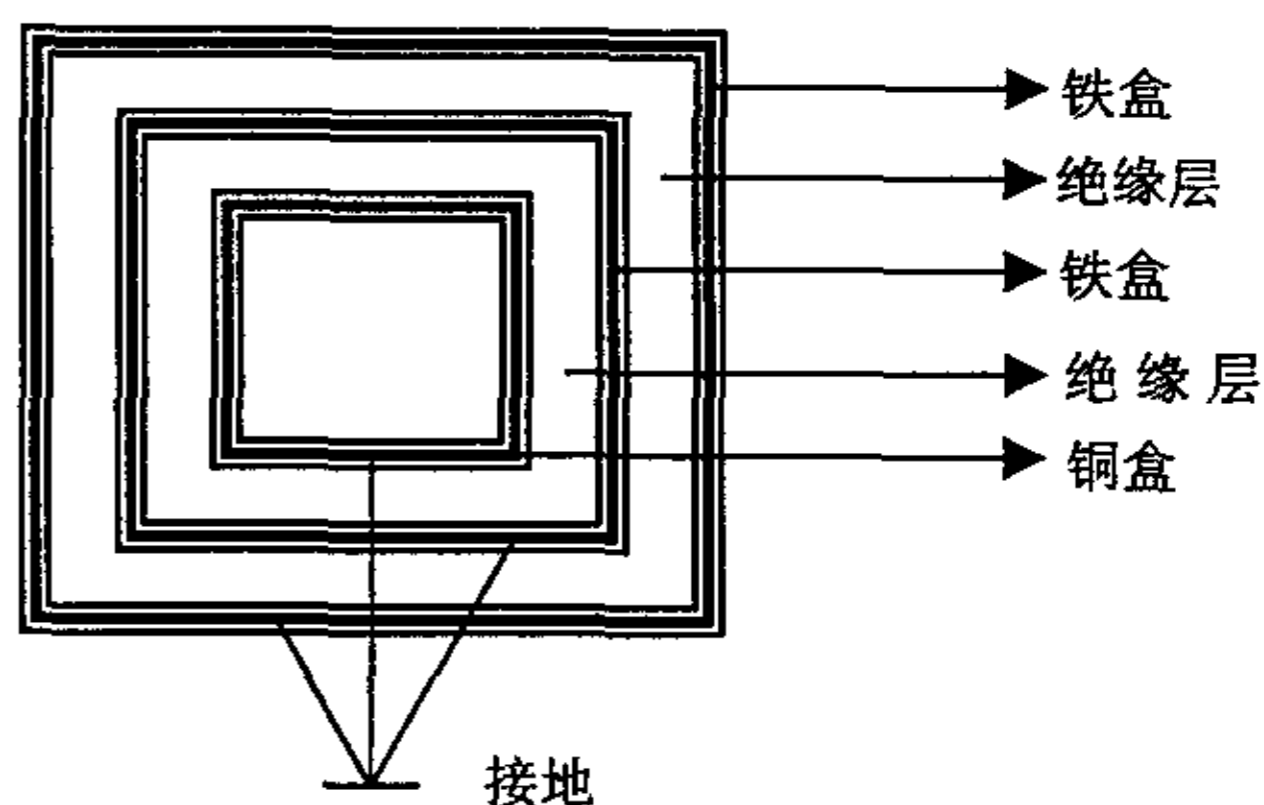


图 2-10 屏蔽示意图

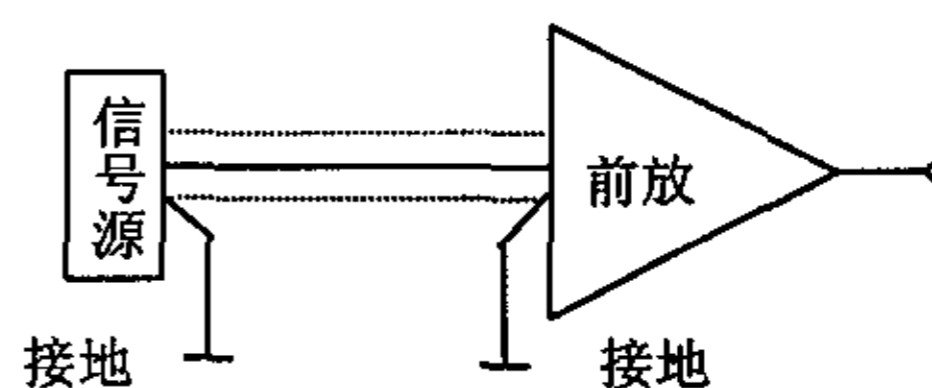


图 2-11 多点接地

## 3.接地技术

测试系统由地线引起的干扰，是经常遇到的一种很严重的干扰，必须引起足够的重视。就整个系统来讲，有信号地、屏蔽壳或机壳地及电源地三种。测试系统中的各种电平信号在电路中如果有公共地线存在，那么信号通过公共地线上产生的电压就会引起寄生耦合。特别严重的是，高电平信号可能会耦合到输入端。因此它们的地线必须分别连到电源端，即采用多点接地方式以消除电磁场的干扰。如图 2-11 所示。另外电源的滤波电容将引入交流  $50\text{Hz}$  电流脉冲，因此其地线必须直接回到电源的负端，而不能与信号地线有公共地线，否则将给前置放大器带来很强的  $50\text{Hz}$  干扰。测试系统的工作环境存在大量的用电设备，特别是动力设备、照明设备或仪器等，这些系统有些直接与大地连接，有

些通过机壳底台与大地连接。这样，在地回路中存在着复杂的地电流，从而造成大地上各点电位的不同，形成了干扰源，如图 2-12 所示。

若传输电缆外皮（信号地）与机壳直接相连，则干扰源  $e$  会产生一个地流环，在电缆线外皮间造成一个干扰电压，设  $R_c$  为电缆外皮电阻，则干扰电压为  $e_n = eR_c / (R_c + R_g)$ ，由此可见图 2-11 所示的屏蔽电缆外皮的多点接地方式，虽然可以抑制空间电磁场的干扰，但对克服接地干扰是不利的。为兼顾上述两种干扰的抑制，我们采取下述措施：电缆线采用单点接地，使信号源与前置放大器实现浮地，以切断地流环，从而大大减小了接地干扰。浮地端用一小电阻接地，用以加强电缆对空间电磁场的屏蔽效果，如图 2-13 所示。采用

双层屏蔽（如图 2-14），效果更好。其中内屏蔽采用浮地方式以消除地流环干扰，外屏蔽采用多点接地，以消除电磁场干扰，并尽量减少电缆的长度。

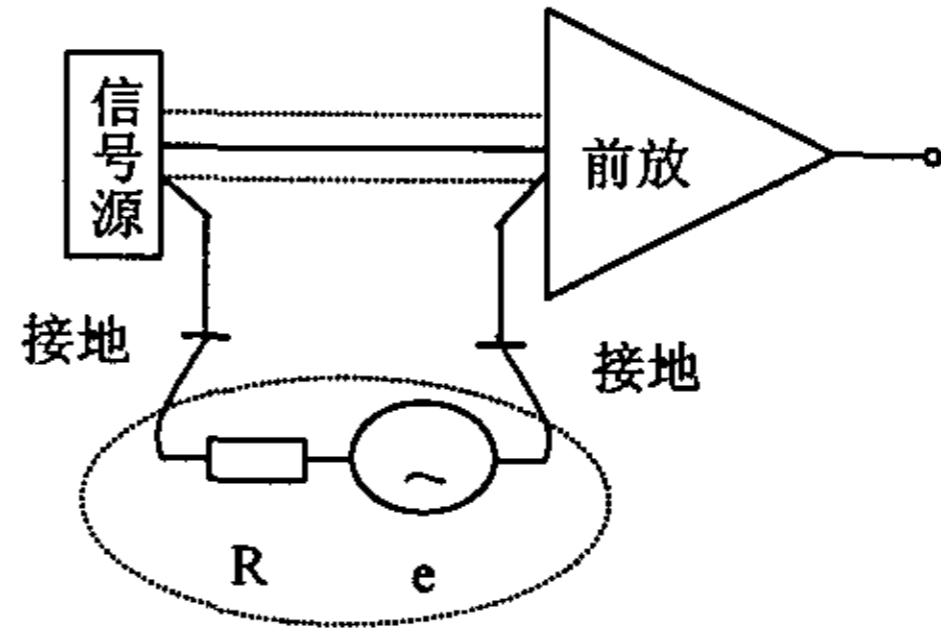


图 2-12 地流环的形成

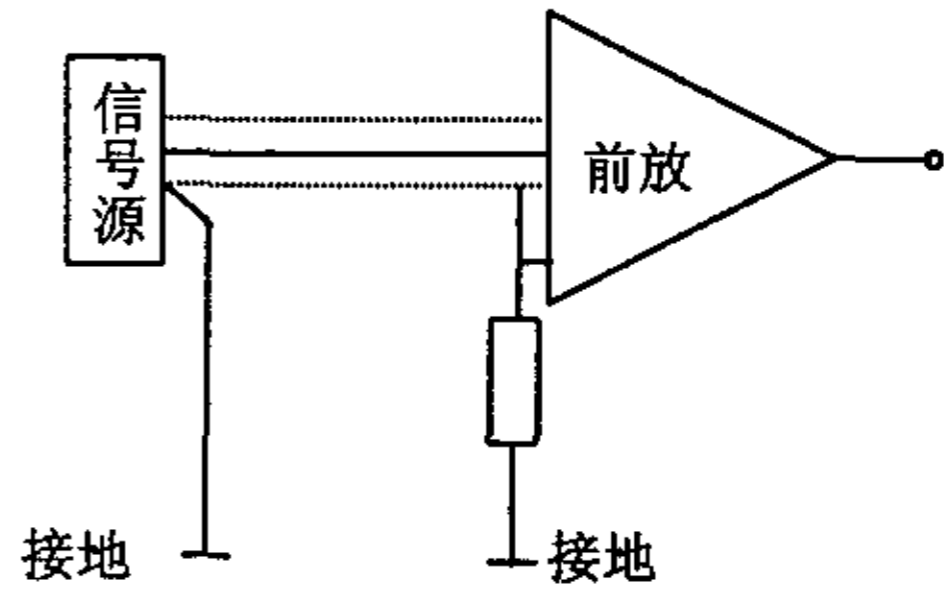


图 2-13 浮地接法

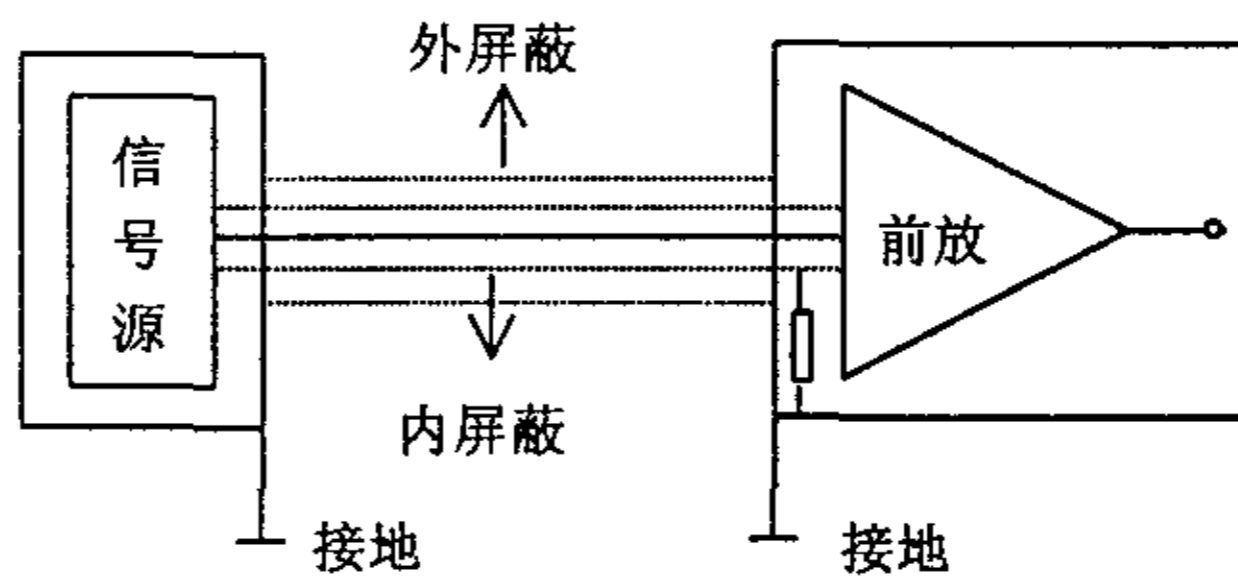


图 2-14 抑制电流环的双重屏蔽

### 2.2.3 测试系统的本底噪声

测试系统本底噪声的功率谱密度如图 2-15 所示。A, B 分别为互谱前后的本底噪声, 在 1KHz 处的值分别为  $1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$  和  $0.1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

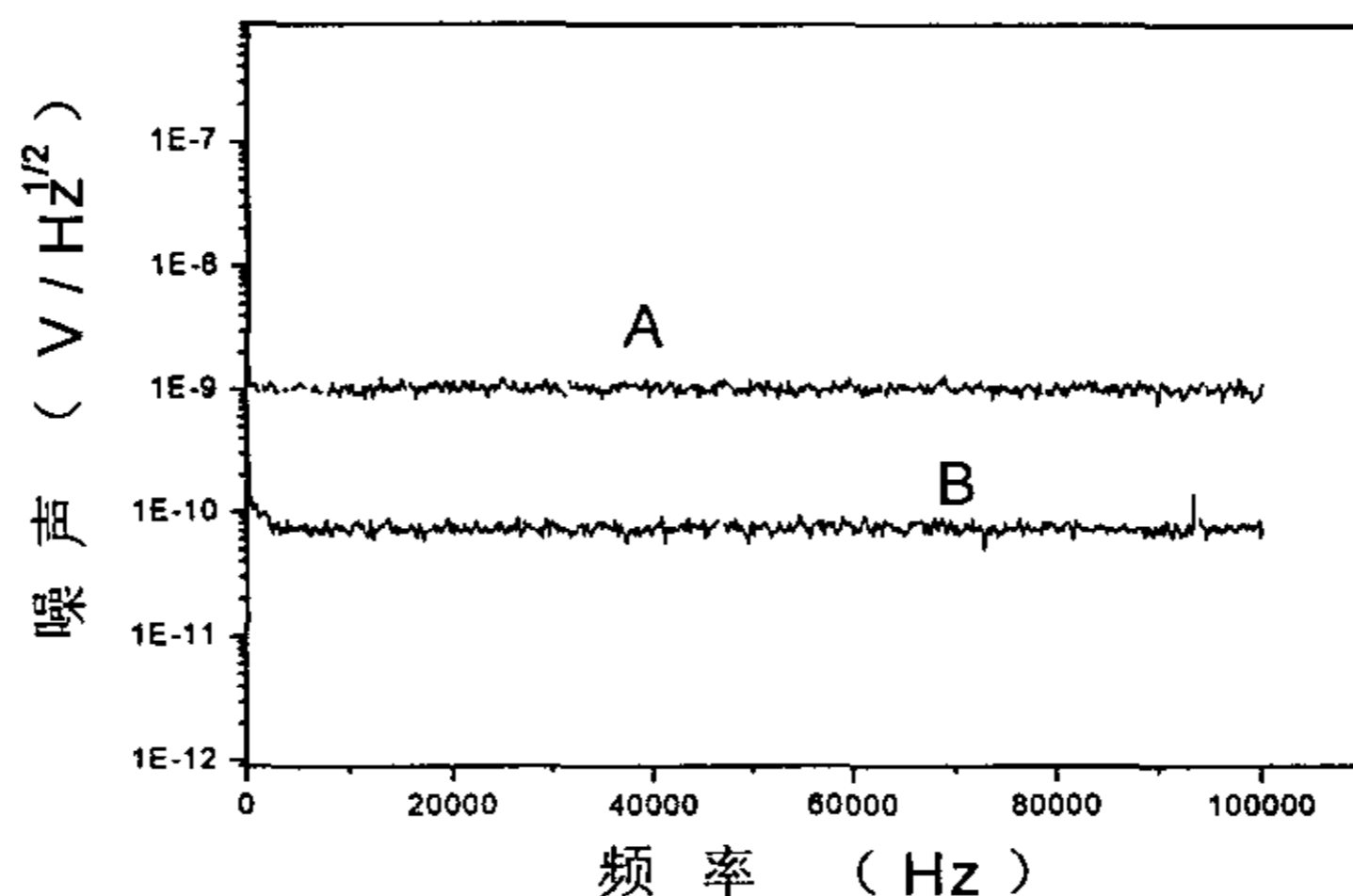


图 2-15 测试系统的本底噪声

## § 2.3 几种常见器件的测量结果

### 2.3.1 808nm 大功率半导体激光器的低频电噪声

808nm 大功率半导体激光器是固体激光器的泵浦源, 本文对用 MOCVD 生长的 GaAs/GaAlAs 单量子阱宽条结构的大功率半导体激光器 (发射波长为 808 nm) 进行不同频率和不同电流下的电噪声测试。

#### 1. 噪声与频率的关系

在室温下, 我们对 808nm 大功率半导体激光器的电噪声进行了测试, 以电流为参量, 电噪声和频率关系的典型结果如图 2-16 所示。可以看出, 对不同电流, 电压噪声随频率的增加而减小。表明 808nm 大功率半导体激光器的电噪声在低频段主要为  $1/f$  噪声, 这与小功率异质结 LD 的噪声特性是一致的 [9, 10]。在小电流条件下, 电压噪声随注入电流的增加而减小, 而且在高频段随

着注入电流的增大白噪声表现得很明显,这也说明随注入电流增大而减小的噪声主要为  $1/f$  噪声。

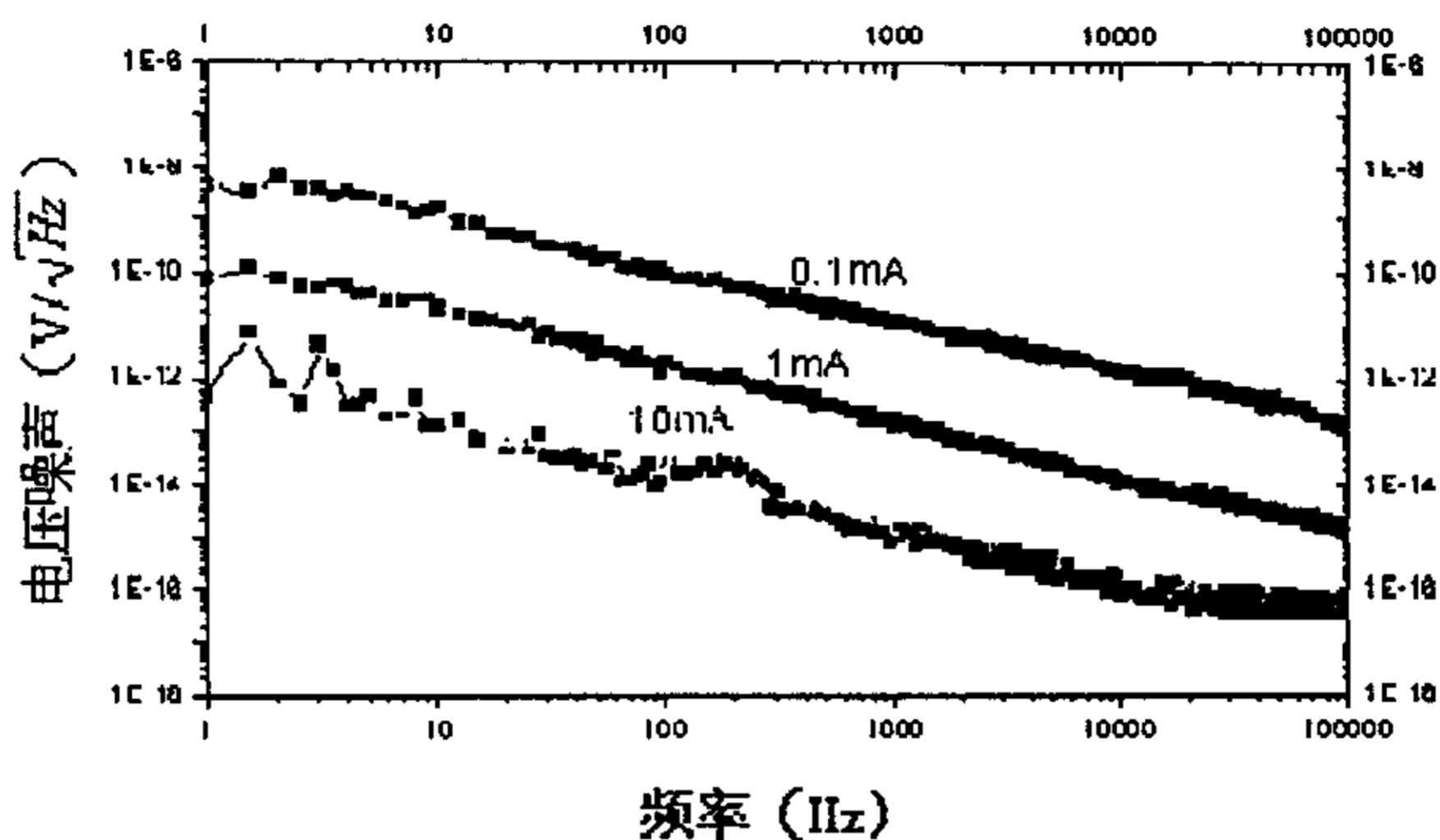


图 2-16 噪声与频率的关系

## 2. 噪声与注入电流的关系

图 2-17 给出了具有代表性的两只管子 (1<sup>#</sup>管, 2<sup>#</sup>管) 的电噪声 (10Hz 处) 与注入电流之间的关系曲线。其中 1<sup>#</sup>管的阈值  $I_{th}=382mA$ , 2<sup>#</sup>管的阈值  $I_{th}=426mA$ 。

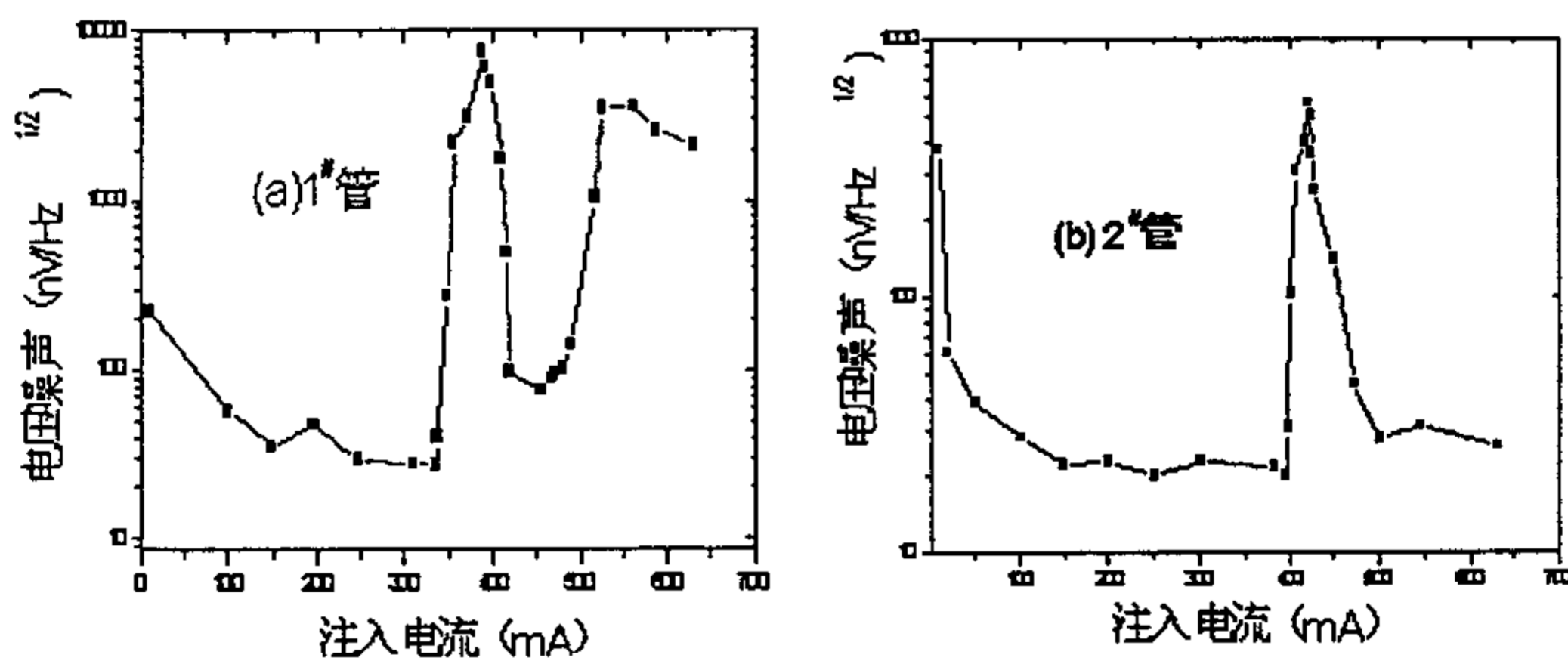


图 2-17 电噪声 (10Hz 处) 与注入电流之间的关系曲线  
由图 2-17 可见, 曲值的低电流区 (1<sup>#</sup>:  $I < 337mA$ , 2<sup>#</sup>:  $I < 397mA$ ), 电噪声

相对较小，且随注入电流的增加而减小，这与 Kleinpenning<sup>[12]</sup>的分析结果是一致的。在阈值电流附近的区域(1#: 337mA<I<416mA, 2#: 397mA<I<450mA)，器件的电噪声明显变大。而离开阈值电流的区域(1#: I>416mA, 2#: I>450mA)，器件的电噪声又变小。

在阈值附近区域噪声变大的原因，可能是由于在该区域时，注入的载流子高速率复合，光子数急剧变化以及增益(吸收)系数涨落、模式竞争等因素使载流子数的涨落较大，因而电噪声明显变大。离开这个区域，进入一个相对稳定的过程，载流子的涨落有所减弱，因而噪声又变小。另外，对于1#管，在I>498mA时，电噪声又开始变大，在I>520mA以后，噪声很大，这可能是由出现了多侧模式振荡的结果的。

### 3. 噪声与光导数、电导数的关系

为了进一步分析噪声的变化及噪声产生的原因，我们测试了器件的电导数( $dV/dI \sim I$ )及光导数( $dP/dI \sim I$ )曲线(见图2-18)。图4中曲线I为电导数曲线，曲线II为光导数曲线。在阈值处，注入载流子高速率复合，结电压饱和，使电导数曲线在阈值处有一下沉，这在光导数曲线上表现为明显的上升。

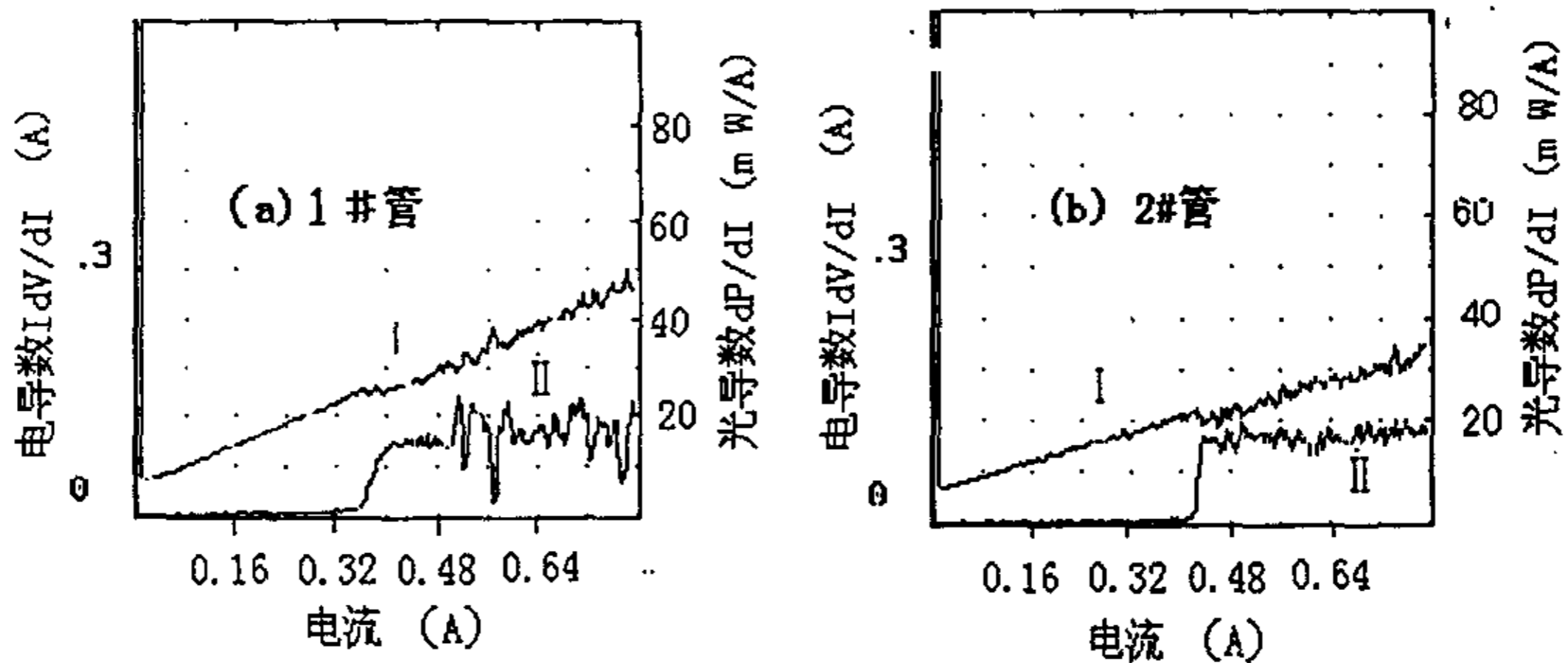


图2-18 器件的电导数( $dV/dI \sim I$ )及光导数( $dP/dI \sim I$ )曲线

从图2-18可以看出，1#管电导数曲线的下沉出现在382mA处，2#管电导数曲线的下沉出现在462mA处，表明两个管子的阈值是不同的，有80mA的差别。这可能是由于两个管子在工艺条件、外延片质量等方面的差别造成的。对于1#管，当I>520mA以后，光导数曲线上出现明显的起伏，表明器件的输出光功率有较大起伏。对于这种宽条形器件，光功率的起伏与器件侧向模式的不稳定有关。由于注入的载流子引起了折射率分布凹变和增益分布凹变，导致

了多侧模振荡，因而在光导数曲线上出现明显的起伏，这种起伏又引起载流子数的起伏，使电噪声明显变大。

### 2.3.2 980nm 大功率半导体激光器的低频电噪声

室温下，测试了 980nm 大功率半导体激光器的低频电噪声的谱密度以及噪声随注入电流的变化情况，分别如图 2-19 和图 2-20 所示。可见 980nm 半导体激光器的低频噪声主要表现为  $1/f$  特性，且在阈值附近有最大值，这与 808nm 大功率半导体激光器的噪声特性是一致的。

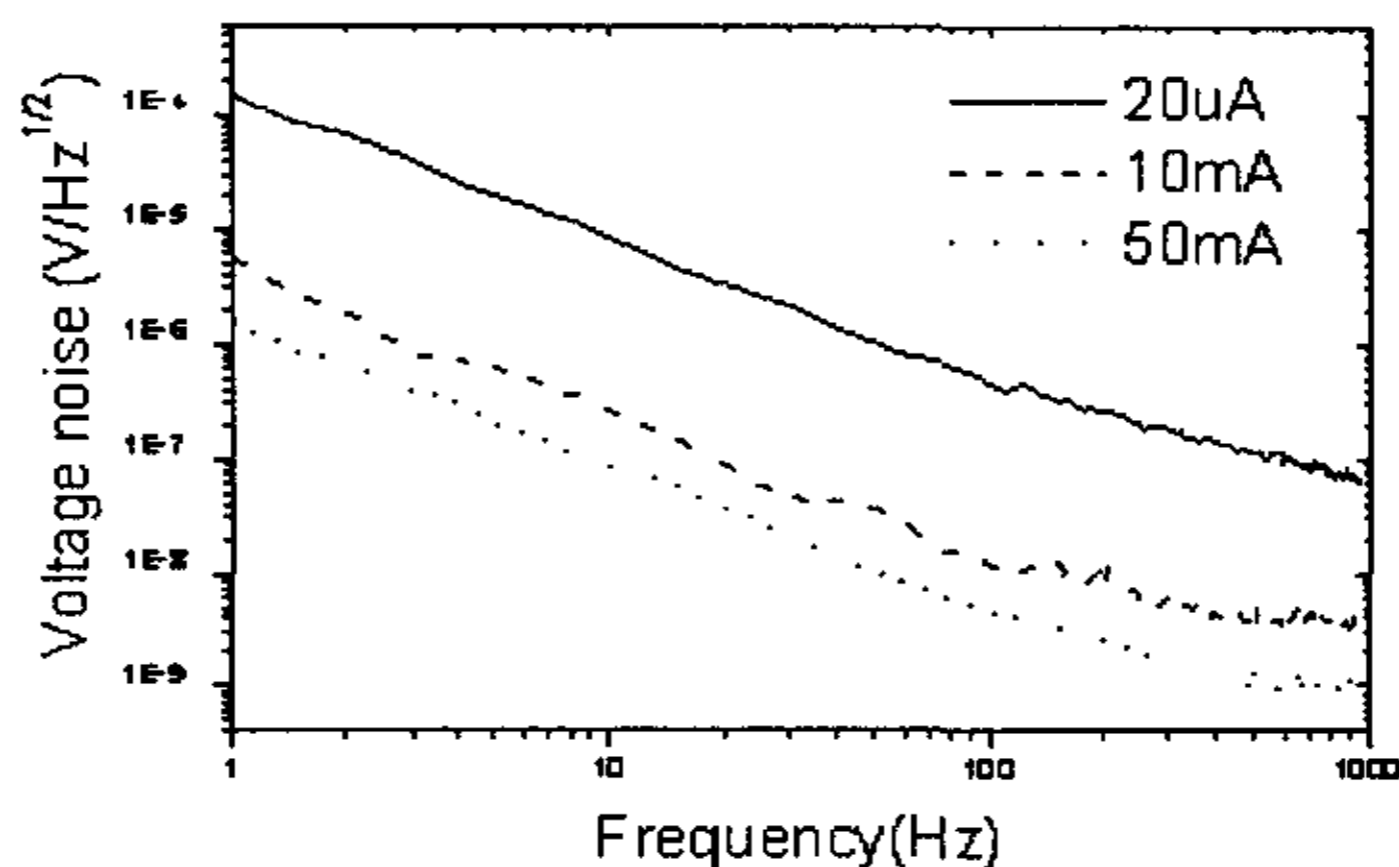


图 2-19 980nmLD 的电压噪声谱密度

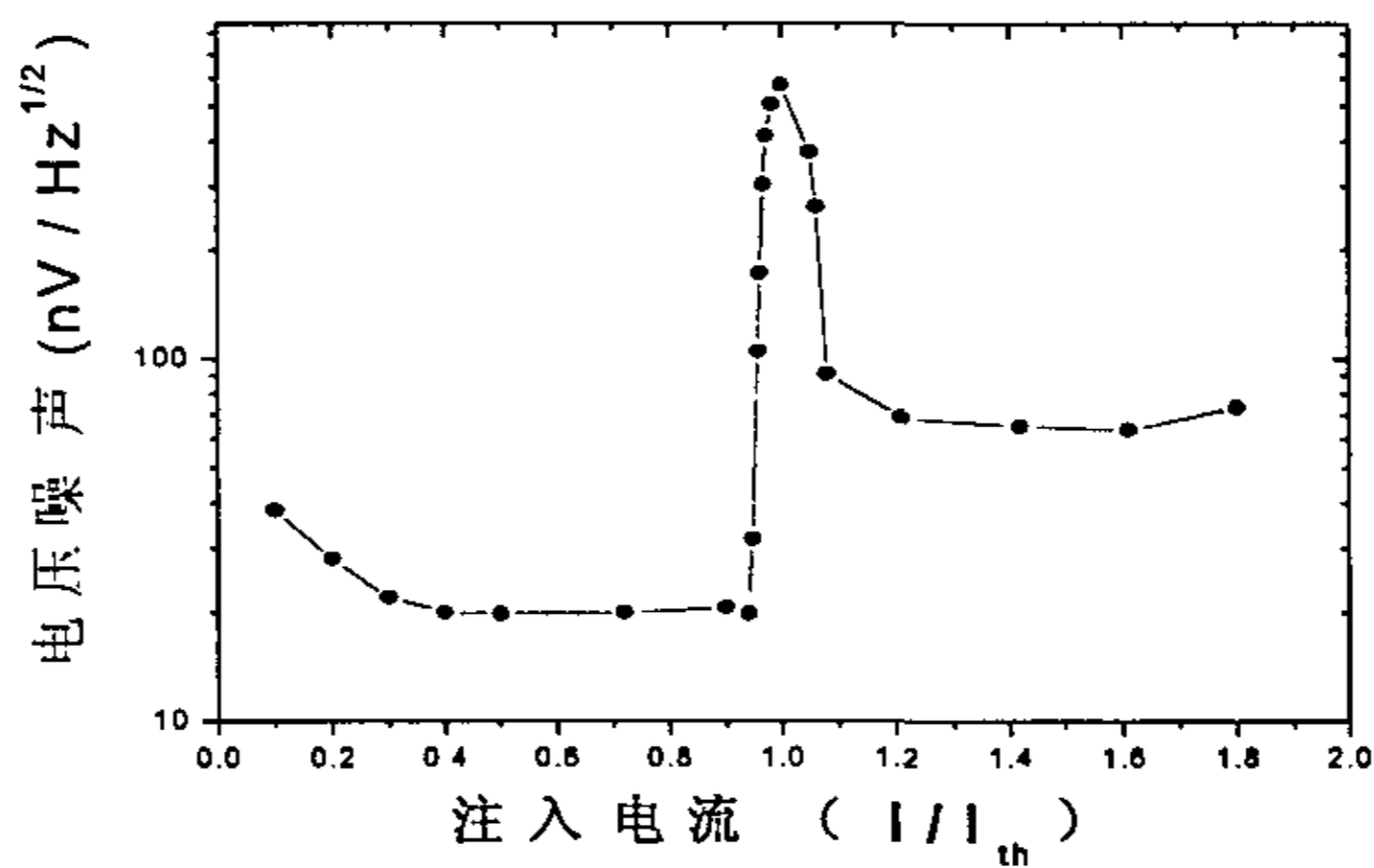


图 2-20 980nmLD 的噪声与注入电流的关系

## § 2.4 小结

本章介绍了测量半导体激光器噪声的几种常用方法,分析了各种方法的原理、特点,并给出了各种测量系统的原理图。以直接测量方法为主体,结合互谱技术,建立了半导体激光器噪声测试系统。采用双重屏蔽技术,即内屏蔽采用浮地方式消除地流环,外屏蔽采用多点接地以消除电磁场的干扰。有效地抑制了外界干扰对测量结果的影响。测试系统的本底噪声小于  $1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ ,采用互谱技术可达到  $0.1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。采用大容量电瓶为激光器提供驱动电流,采用适当的滤波和分压技术,使驱动电路既可以提供  $10\mu\text{A}$ - $600\text{mA}$  宽范围驱动电流,又有效地减少了驱动电流涨落对测试结果的影响,取得了满意的效果。测量了  $808\text{nm}$  和  $980\text{nm}$  大功率 LD 的低频电噪声,研究了噪声与注入电流,频率,电光导数间的关系。通过实验测试和结果分析,我们可以得到如下的结论:

1.  $808\text{nm}$  和  $980\text{nm}$  大功率半导体激光器的电噪声在低频段主要为  $1/f$  噪声。
2. 器件的电噪声在阈值附近较大,而在阈值附近区域,电噪声和光噪声有强的相关性<sup>[13]</sup>,因此器件工作时,选取的驱动电流这个区域,以保证输出光功率的稳定性。
3. 电噪声的大小与器件的光导数曲线具有相关性,光导数曲线起伏较大时,电噪声也较大。

参考文献:

- [1]戴逸松. 微弱随机信号功率谱互相关测量原理及性能研究. 计量学报, 1991, 12(4), 306-314.
- [2]Carmin ciofo,Marco De Marinis,and Bruno Neri. Ultralow-noise PC-Based Measurement System for the characterization of the Metallizations of Integrated Circuits. IEEE Trans.Instrumation and Measurement. 1997, 46(4), 789-793.
- [3]ShiYuanUang;Tsuneki sasaki et al. Measurements on Low-Frequency Fluctuation in the laser Diodes. IEEE Trans. Electron. Device, 1994,. 41(11), 2162-2164.
- [4]R.J.Fronen. Wavelength Dependence of  $1/f$  noise in the light output of laser Diodes : An Experimental study. IEEE J Quantum Electron, 1990, 26(10), 1742-1746.
- [5]S. Piazzolla, P. Spano, M. Tamburrini. Characterization of phase noise in semiconductor lasers. Apple. Phys. Letter, 1982, 41(8), 695-696.

- [6] Y. Yamamoto, T. Mukai, S. Saito. Quantum phase noise and line width of a semiconductor laser. *Electronic letter*. 1981, 17(9), 327-329.
- [7] B. Daino, P. Spano, A. Tamburrini et al. Phase Noise and Spectral line Shape in Semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*. 1983, QE-19(3), 266-270
- [8] Edgard Goobar. A Michelson interferometer With Balance Detection for The characterization of Modulation and Noise properties of Semiconductor Laser. *IEEE J QE*. 29(4), 1116-1124.
- [9] Sheng-lyang Jang. Low-Frequency current and Intensity noise in AlGaAs Laser Diodes. *Solid-state Electronics*. 1993, 36(2), 189-196.
- [10] Shi Jiawei et al. An improved approach and experimental results of a low-frequency noise measurement technique used for reliability estimation of diode lasers. *Microelectronics Reliability*, 1994, 34(1), 1261-1264.
- [11] G. Tenchio .Low-frequency intensity fluctuations of C.W.D.H. GaAlAs diode lasers. *Electronics letters*, 1976, 12(21), 562~563.
- [12] Kleinpenning T.G.M. 1/f noise in P-N diode *Physics*, 1980, 98B, 289-299.
- [13] Bernard Orsal. Et al. Correlation between electrical and optical photocurrent noise in semiconductor laser diode. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1994 41 (11) P2151~2161

## 第三章 噪声分析在半导体激光器质量表征中的应用

### § 3.1 腔面状况与噪声的关系

影响器件性能和寿命的一个重要方面就是腔面的状况，腔面中缺陷、位错以及粘污的存在，使非辐射复合增多，造成腔面温度升高，出现灾变性损伤（COD）。特别是在高功率状态下工作时，COD 成为限制器件寿命的主要因素<sup>[1]</sup>。而腔面状况的好坏与器件噪声有着直接的联系。腔面中的杂质、缺陷、表面态、界面态以及表面的化学腐蚀和周围环境的潮湿都是器件噪声的重要来源，将带来过剩的  $1/f$  噪声<sup>[2]</sup>。特别是在小注入下，器件的噪声将主要来源于腔面状况的不完善。所以，器件在小注入下的噪声大小或其变化情况反映了腔面状况的好坏。另外，非辐射复合电流的大小也是腔面状况的一种表征手段，G.Beister 等人通过测量非辐射复合电流的大小，对腔面的稳定性进行了估计<sup>[3]</sup>。在本节中我们首先讨论了器件腔面状况改变对噪声的影响，然后讨论了器件在小电流下的噪声与表面非辐射复合电流的相关性。

#### 3.1.1 腔面状况改变对器件噪声的影响

##### 1. 腔面钝化对器件噪声的影响

研究表明，表面钝化能够有效地改善半导体激光器的光电特性<sup>[4,5]</sup>。腔面钝化后，大大减小了二极管激光器的表面态，极大提高了二极管激光器的 COD 阈值；使器件的可靠性得到明显改善。我们观测了腔面钝化后器件噪声的变化情况。

把腔面未镀膜的激光器（808nm QW 高功率 LD）放入  $\text{Na}_2\text{S}$  的异丙基酒精饱和溶液中浸泡 2 分钟，取出后，放入异丙基酒精中清洗，然后在空气中风干。分别测量了腔面钝化前后器件噪声的电压功率谱密度，如图 3-1（a）所示。可见器件噪声主要为  $1/f$  噪声，腔面钝化后器件噪声明显下降。

在半导体表面，晶体的周期性被破坏而在禁带中形成局部状态的能级分布，这些状态称为表面态。在实际的器件中，形成表面态的因素还很多。在实际的半导体表面存在着各种类型的宏观和微观的结构缺陷，这些缺陷是在形成表面或者晶体生长时带来的天然缺陷。另外，半导体表面与周围的媒介直接接触，吸附或各种物质的沾污而形成表面态，或者进行化学反应而表面形成的氧化层都是表面能级形成的原因。这些具有不同能级的表面态位于禁带中，构成了电子-空穴的复合中心。电子和空穴在表面态的复合导致半导体激光器中的

载流子密度涨落,而且表面态与半导体导带或价带交换载流子的时间常数在一个相当宽的范围内连续分布,所以表面态是一个  $1/f$  噪声源。

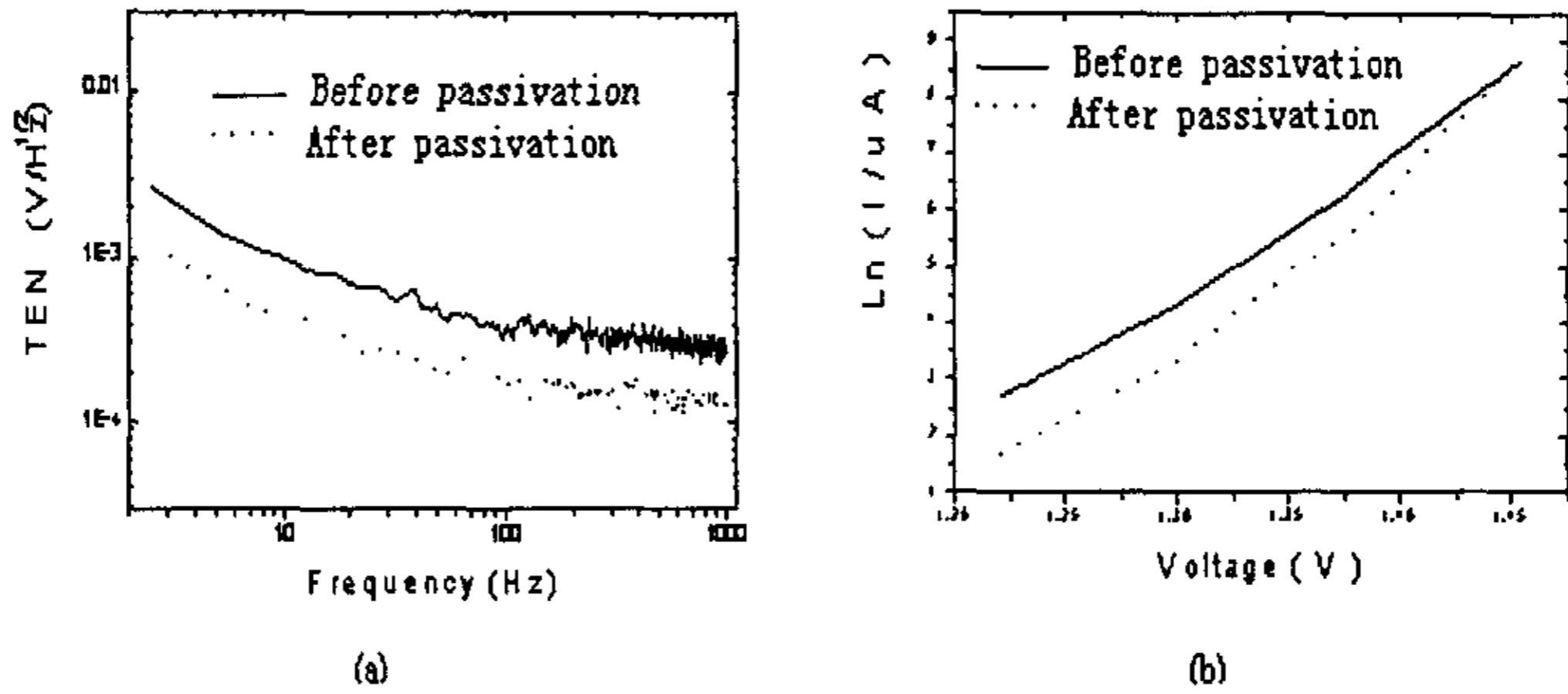


图 3-1 钝化前后器件噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

根据  $1/f$  噪声的表面载流子数目涨落模型<sup>[6]</sup>,由表面复合电流引起的  $1/f$  噪声可以表示为

$$S_{I_p}(f) = (qp)^2 S_s(f) = (qp)^2 Cs / f \quad (3.1)$$

其中  $q$  为电子电荷,  $p$  为单位表面面积元  $dA$  的非平衡载流子浓度,  $C$  为常数,  $s$  为表面复合速度。 $S_s(f)$  代表由表面复合速度涨落引起的噪声。表面复合电流的强度为

$$I_{ps} = \int J_{ps} dA = qsp(0)A \quad (3.2)$$

$A$  为有效复合面积,  $p(0)$  代表表面载流子平均浓度。 $J_{ps}$  为表面复合电流密度, 可以表示为

$$J_{ps} = qps \quad (3.3)$$

设各个表面元的涨落相互独立, 则有

$$S_{I_p}(f) = (q)^2 \frac{Cs}{f} \int p^2 dA = q^2 \frac{Cs}{f} p(0)^2 A_s' = \frac{B}{fs} I_{ps}^2 \quad (3.4)$$

$B$  为常数,  $A_s'$  为另一有效复合面积。可见噪声的大小与表面电流的平方成

比例。腔面钝化后，表面态减少，由此产生的非辐射复合电流减少，因此器件噪声下降。

另外，表面复合的减少也改变了器件的 I—V 特性（如图 3-1 (b) 所示，纵轴为电流的自然对数坐标）。流过器件的电流可以分为两部分，即体复合电流和表面复合电流。腔面钝化后，表面非辐射复合电流下降，所以在同样的偏置下，流过器件的总电流减小。

腔面钝化后，器件 1/f 噪声下降，也说明了表面态是器件 1/f 噪声的一个重要来源。

## 2. 化学腐蚀对器件噪声的影响

将器件腔面用 HF 腐蚀，清洗后在空气中风干。腐蚀前后器件的噪声和 I-V 特性如图 3-2 所示。腐蚀后，一方面使器件腔面变粗糙，表面积变大，导致表面态增多。另一方面，HF 腐蚀后可能在器件表面引入新的缺陷。这些都将导致非辐射复合电流增大，近而使器件的噪声和 I-V 特性发生明显变化。另外，HF 腐蚀后，腔面可能残留氢离子，氢离子的迁移也将给器件的噪声和 I-V 特性带来影响<sup>[7]</sup>。

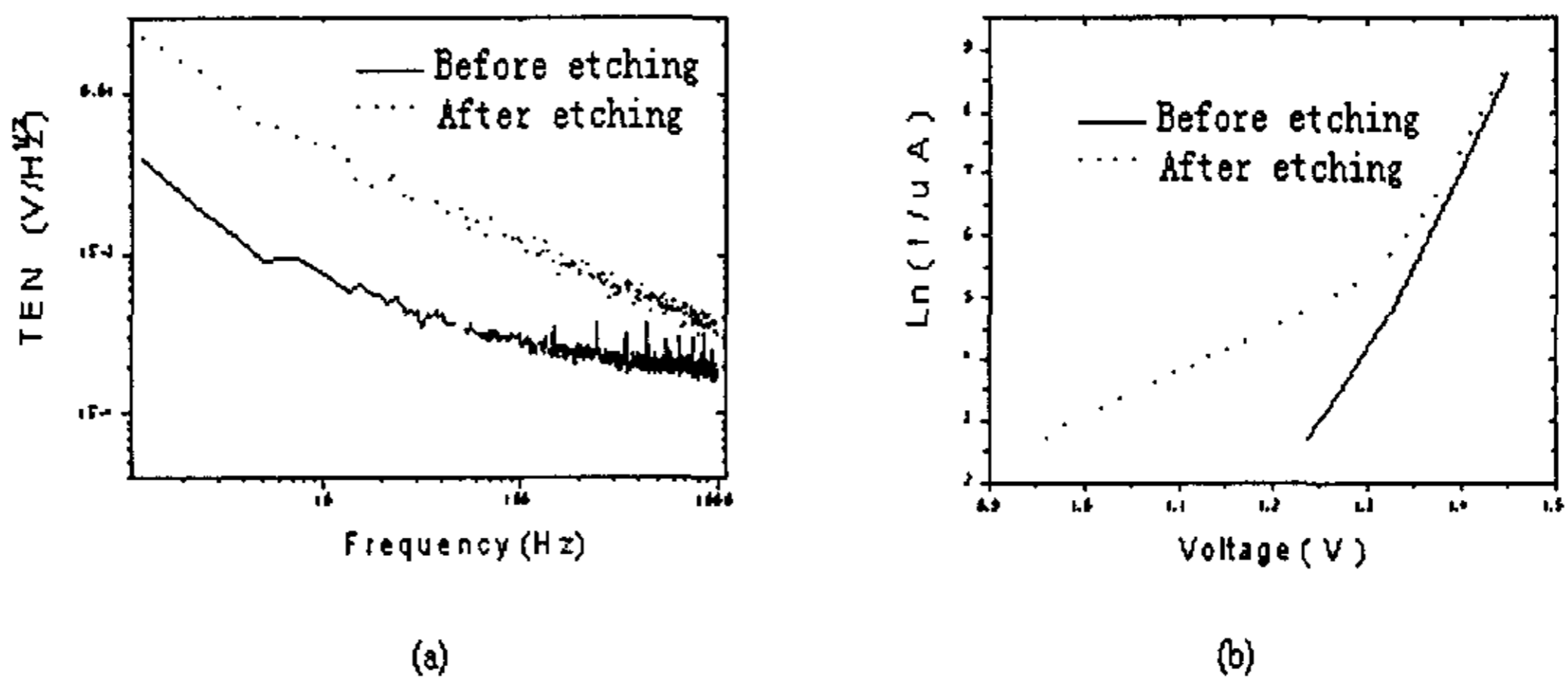


图 3-2 腐蚀前后器件噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

## 3. Na<sup>+</sup>沾污对器件噪声的影响

Na<sup>+</sup>沾污前后器件噪声和 I-V 特性的变化如图 3-3 所示。Na<sup>+</sup>沾污后器件噪声变大，在小注入下器件的 I-V 特性变化明显，其原因可能是可动电荷 Na<sup>+</sup>在外加电压的作用下在器件表面产生横向及纵向移动，导致流过器件的电流随机

涨落，使器件噪声变大并调制了器件的 I-V 特性。

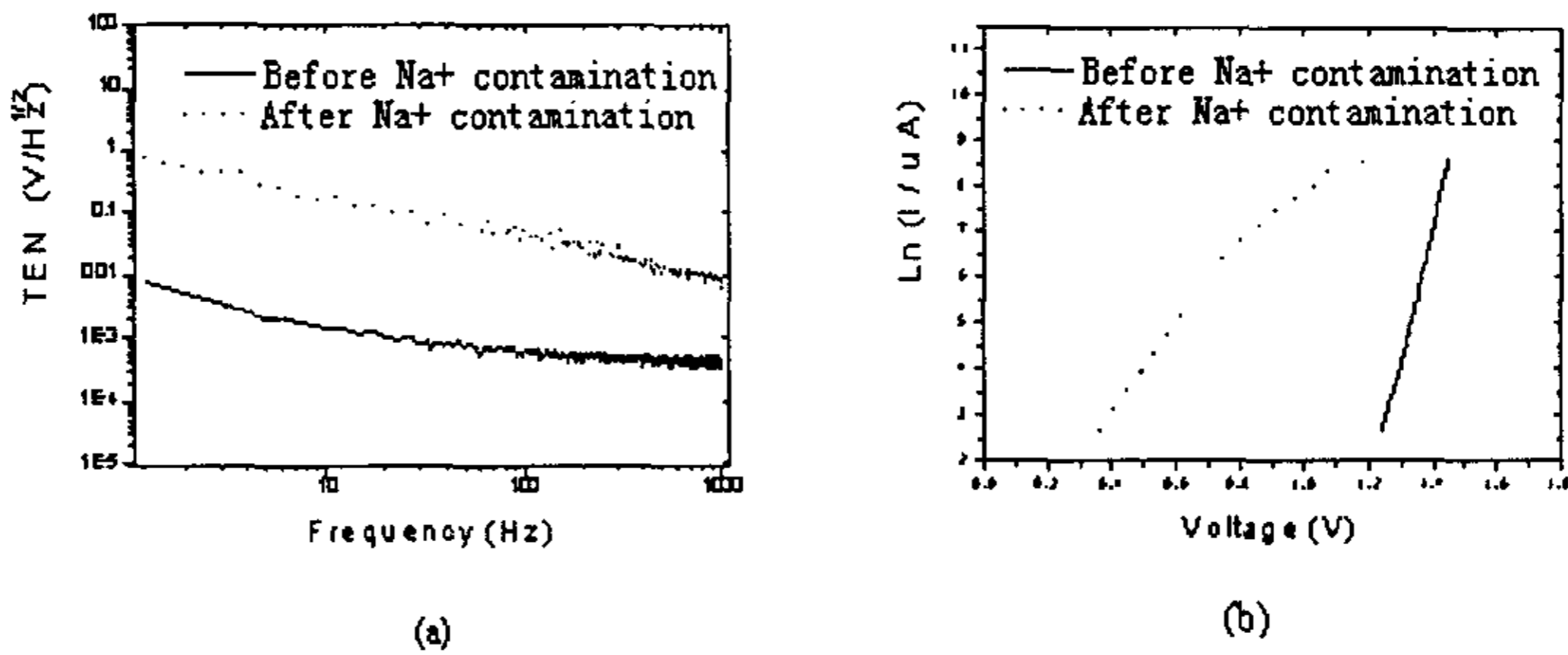


图 3-3  $\text{Na}^+$  沾污前后器件噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

### 3.1.2 噪声与非辐射复合电流的关系<sup>[8,9]</sup>

#### 1. 实验结果

在室温下 ( $20^\circ\text{C}$ )，我们测试了器件的低频电噪声，为充分反映非辐射复合电流的涨落情况，工作电压选为  $0.9\text{V}$  (器件处于未导通状)。我们又在同样的工作电压下，测试了流过器件的电流  $I$ 。图 3-4 给出了 28 只器件的低频电噪声 ( $1\text{Hz}$  处) 与  $I$  的对应关系。可以看出，大多数器件的低频电噪声与流过器件的电流有较好的对应关系，即噪声大的器件  $I$  也大，噪声小的器件  $I$  也小。但也有个别器件表现异常，图 3-4 中用  $\blacktriangle$  标出。

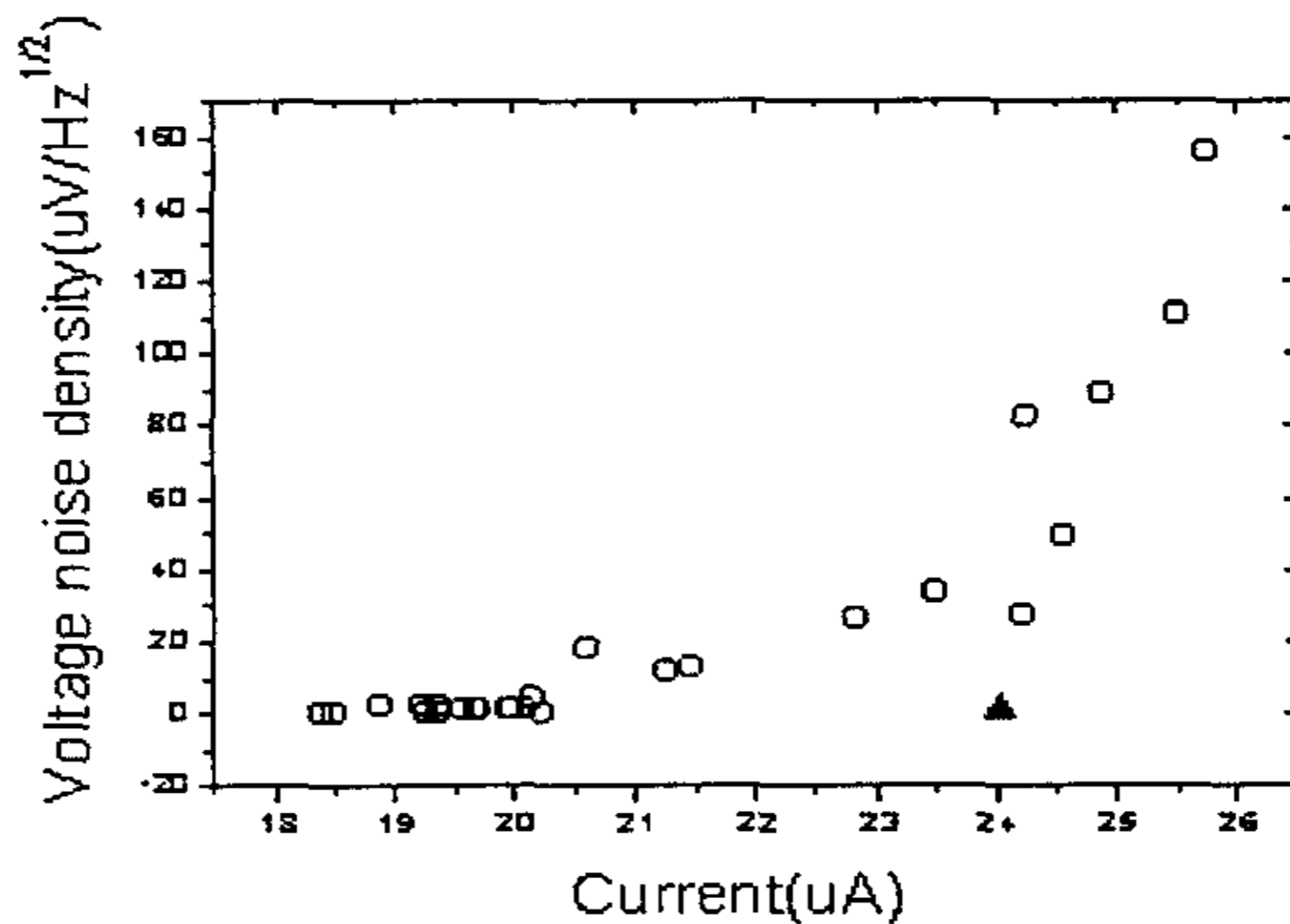


图 3-4 噪声与表面复合电流的关系

## 2. 实验结果讨论

流过器件的电流可以表示为  $I=I_{nr}+I_j$ ，其中， $I_j$  为流过 pn 结的体电流， $I_{nr}$  为非辐射复合而产生的表面复合电流。从图 3-1, 2, 3 可以看出，腔面状况的改变调制了器件的 I-V 特性，但主要是改变了小电流下的 I-V 特性，也就是说在小注入下，流过器件的电流中，表面非辐射复合电流  $I_{nr}$  是主要的。所以  $I$  的大小反映了表面非辐射复合电流的大小<sup>[3]</sup>。而器件表面复合电流主要是由于表面中缺陷、杂质、位错等因素引起的，这些因素都起着非辐射复合中心的作用，这些非辐射复合中心随机俘获和释放载流子，引起表面复合电流的涨落，带来过剩的  $1/f$  噪声。表面缺陷、杂质、表面态多，表面复合电流就大，引起的表面  $1/f$  噪声也必然大。反之，表面缺陷、杂质、表面态少，表面复合电流就小，引起的表面  $1/f$  噪声也小。所以，对于大多数器件，噪声与流过器件的电流有较好的相关性。

为了进一步验证器件低频电噪声与表面非辐射复合电流间的关系，我们又分别在不同条件下对器件低频电噪声和器件非辐射复合电流进行了测量。在室温下，对器件进行了 800 小时的恒流 (260mA) 电老化，分别测量了器件老化前后的电噪声 (注入电流为  $20\mu\text{A}$ )，其中电噪声变化明显的器件 (如 B19<sup>#</sup>)，其小电流下的 V-I 特性也有较大变化，如图 3-5 所示；而电噪声变化不大的器件 (如 B11<sup>#</sup>)，其小电流下 V-I 曲线变化也不明显，如图 3-6 所示。其中 B19<sup>#</sup>，老化前在 1Hz 处 (注入电流为  $20\mu\text{A}$ ) 的电噪声为  $0.847\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ ，老化后为  $1.860\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ ，而 B11<sup>#</sup> 老化前为  $1.47\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ ，老化后为  $1.51\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

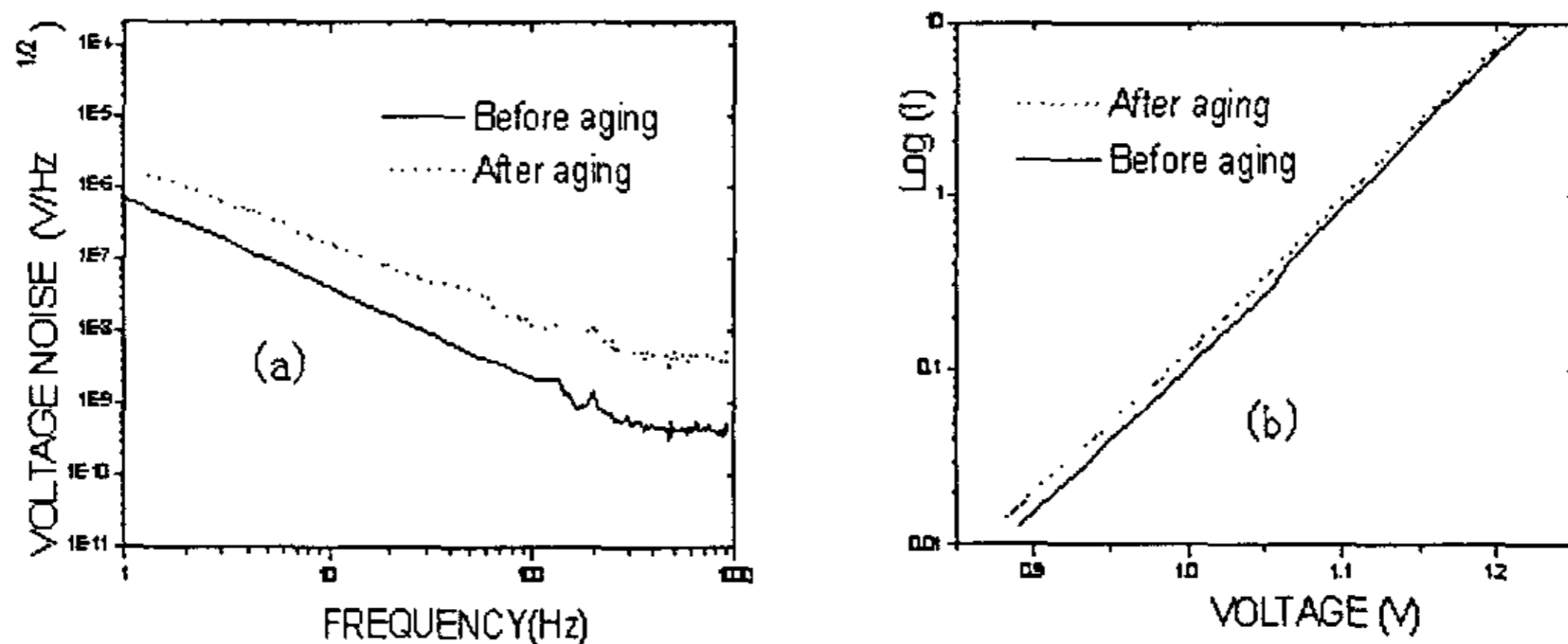


图 3-5 B19<sup>#</sup>器件老化前后噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

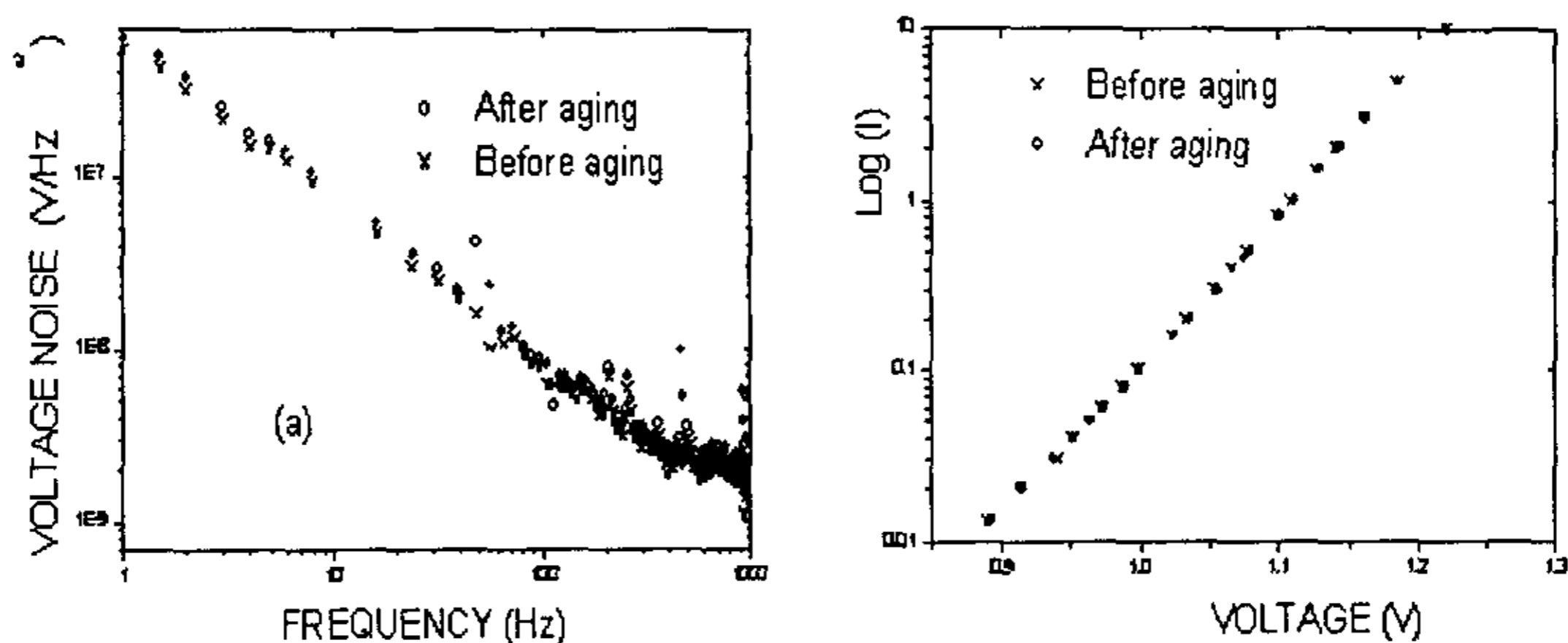


图 3-6 B11#器件老化前后噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

我们又在不同温度下，重复了上述测试，结果发现温度升高，器件在小注入下的低频电噪声和表面复合电流都明显增大，再一次表明低频电噪声与表面复合电流间的相关性。如 B26#管，在 20° C 时，注入电流为 20 μ A 时，其 1 Hz 处的电噪声为 1.81 μ V/Hz<sup>1/2</sup>，在 65° C 时为 94.2 μ V/Hz<sup>1/2</sup>，而升温前后其小电流下的 I—V 曲线也发生明显变化。升温前后，器件的电噪声谱和 I—V 曲线如图 3-7 所示。当温度升高后，表面缺陷增长，使器件低频电噪声和表面复合电流都增大。另外老化以后，有的器件表面缺陷增长较多，器件的低频电噪声和表面复合电流变化都较大，而有的器件表面缺陷增长较少。器件的低频电噪声和表面复合电流变化也较小。

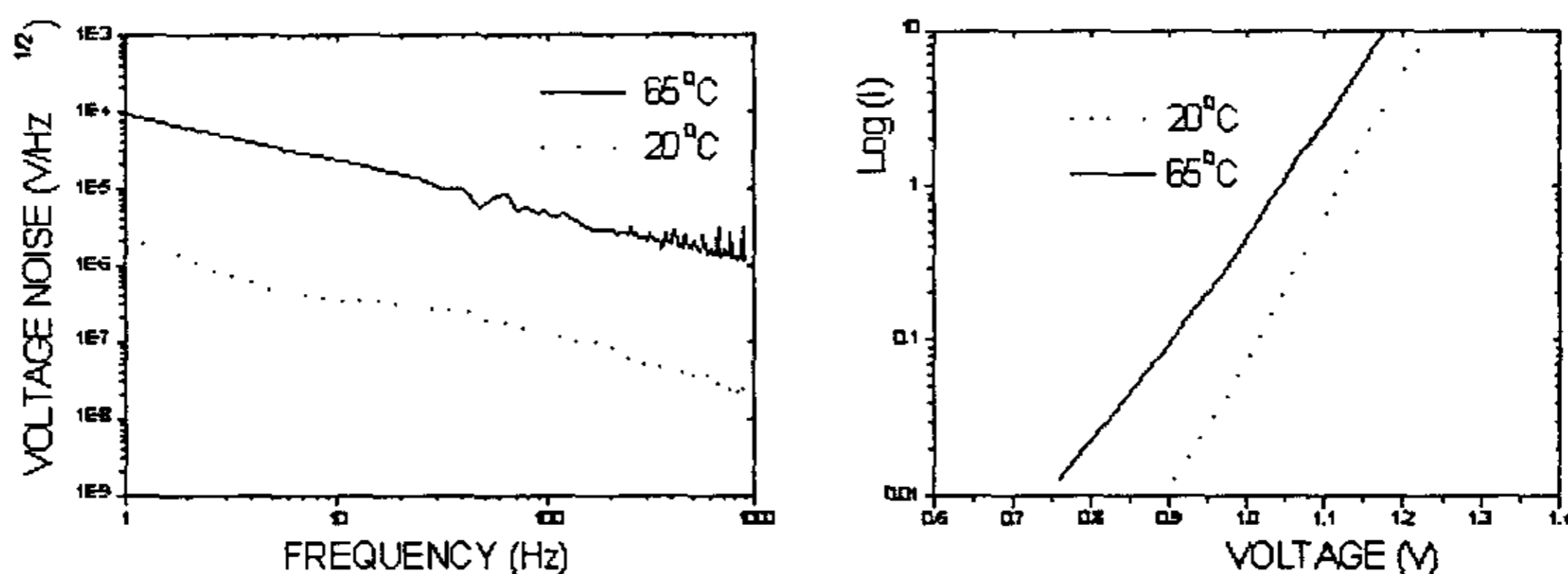


图 3-7 B26#器件升温前后噪声 (a) 和 I-V 特性 (b) 变化

为了分析图 3-4 中的特殊器件 (B20#，用 ▲ 标出) 表现异常的原因，我们测试了器件的电导数和光导数，一般器件的电、光导数曲线如图 3-8 所示，其

中曲线(1)为电压—电流(V—I)曲线,(2)为电导数( $dV/dI—I$ )曲线,(3)为光功率—电流(P—I)曲线,(4)为光导数( $dP/dI—I$ )曲线。B20<sup>#</sup>器件的电导数曲线如图3-9所示,器件电导数曲线的初始位置有一蜂起,且该器件的m值偏大,为4.9(一般器件为2.2左右),阈值偏高,为165mA(一般器件为120mA左右),这说明该器件存在并联漏电回路<sup>[10]</sup>。电压噪声 $S_v=S_i \cdot R^2$ , $S_i$ 为电流噪声,R为LD的等效电阻。即电压噪声大小既与电流的涨落有关又与等效电阻有关。B20<sup>#</sup>器件的I值大但噪声小的原因可能是并联回路的存在,使器件的等效电阻R较小,导致电压噪声较小。

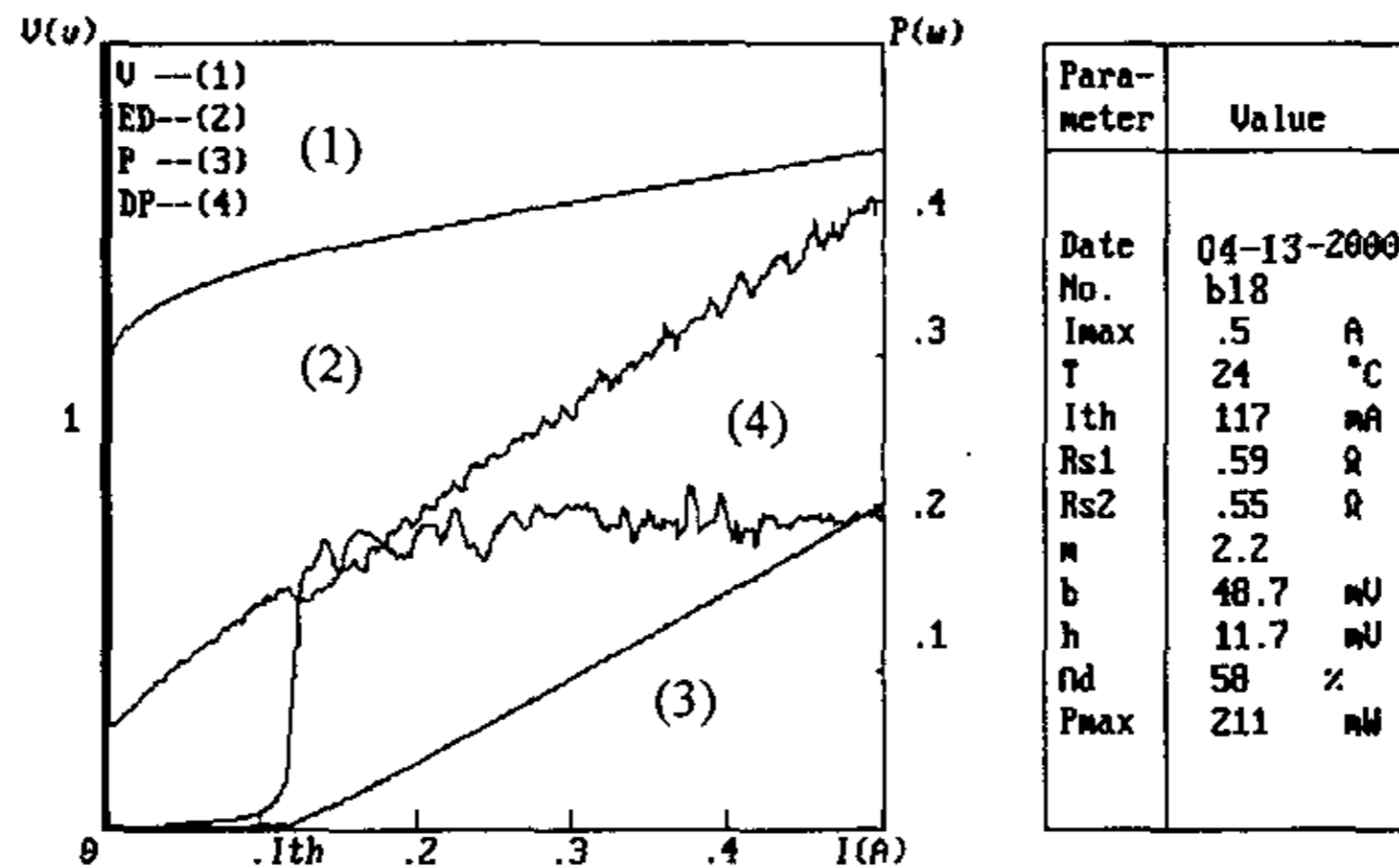


图 3-8 一般器件的电导数曲线

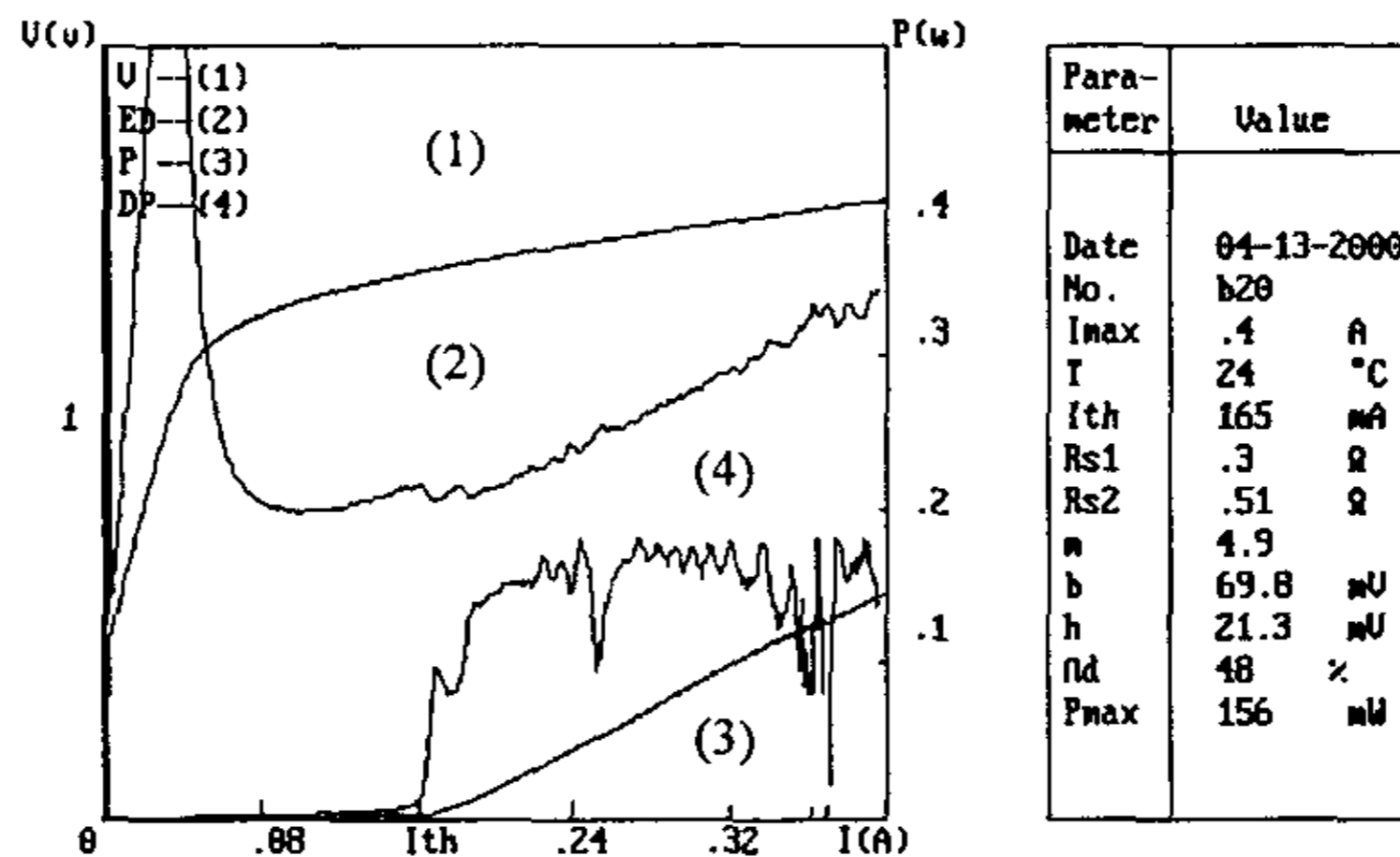


图 3-9. B20 器件的电导数曲线

### § 3.2 串并联回路对噪声的影响

#### 3.2.1 串联回路的影响

将半导体激光器 (LD) 分别串联不同阻值的电阻, 在  $I=20\mu\text{A}$  和  $I=5\text{mA}$  电流下, 测量串联电阻对器件噪声的影响, 测试结果 (如表 3-1, 2 所示) 表明, 串联电阻对器件噪声影响不大。

表 3-1,  $I=20\mu\text{A}$  时, 串联电阻对器件噪声的影响  
( $f=2.5\text{Hz}$ , 噪声单位  $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )

管号	$1\Omega$	$5\Omega$	$10\Omega$	$20\Omega$	二极管	初测值
2505	8.89m	11.75m	11.7m	12.98m	12.8m	9.9m
B41	752 $\mu$	833 $\mu$	816 $\mu$	885 $\mu$	891 $\mu$	878.2 $\mu$
2496	561 $\mu$	572 $\mu$	606	623 $\mu$	617 $\mu$	556.6 $\mu$
13	10.8m	11.7m	13.8m	14.1m	14m	14.68m

表 3-2,  $I=5\text{mA}$  时, 串联电阻对器件噪声的影响  
( $f=2.5\text{Hz}$ , 噪声单位  $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )

管号	初测值	$1\Omega$	$5\Omega$	$10\Omega$	$20\Omega$	二极管
2505	152.23 $\mu$	146.3 $\mu$	204. $\mu$	217 $\mu$	212.9 $\mu$	199.5 $\mu$
B41	625 $\mu$	660 $\mu$	758 $\mu$	736 $\mu$	786 $\mu$	921 $\mu$
2496	94.6 $\mu$	90.2 $\mu$	91.67 $\mu$	101.2 $\mu$	102.3 $\mu$	98.7 $\mu$
13	141.6 $\mu$	130.5 $\mu$	140.1 $\mu$	141 $\mu$	142.7 $\mu$	138.6 $\mu$

有串联回路时器件的等效电路如图 3-10 (a) 所示。 $R_d$  为激光器的微分电阻,  $R_s$  代表外加的串联电阻。

有串联回路时, 总的噪声由两部分组成, 一是 LD 产生的噪声, 二是串联电阻产生的噪声。电阻产生的噪声包括白噪声和过剩噪声, 可以表示为<sup>[11]</sup>

$$S(f) = 4kTR + \frac{MI_D^2 R^2}{f} \times 10^{-12}, \quad M = 0.44 \times 10^{10} \quad (3.5)$$

NI 称为噪声指数, 对于金属膜电阻, NI 的典型值为  $-20\text{dB}$ <sup>[12]</sup>。 $S(f)$  的单位是  $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$ 。 $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $I_D$  是流过电阻的电流,  $R$  是

电阻的阻值,  $f$  是频率。根据 (3.5) 式可以方便地计算出电阻在不同电流下的噪声。表 3-3 给出了不同阻值电阻在  $20\mu\text{A}$  和  $5\text{mA}$  电流下的噪声。

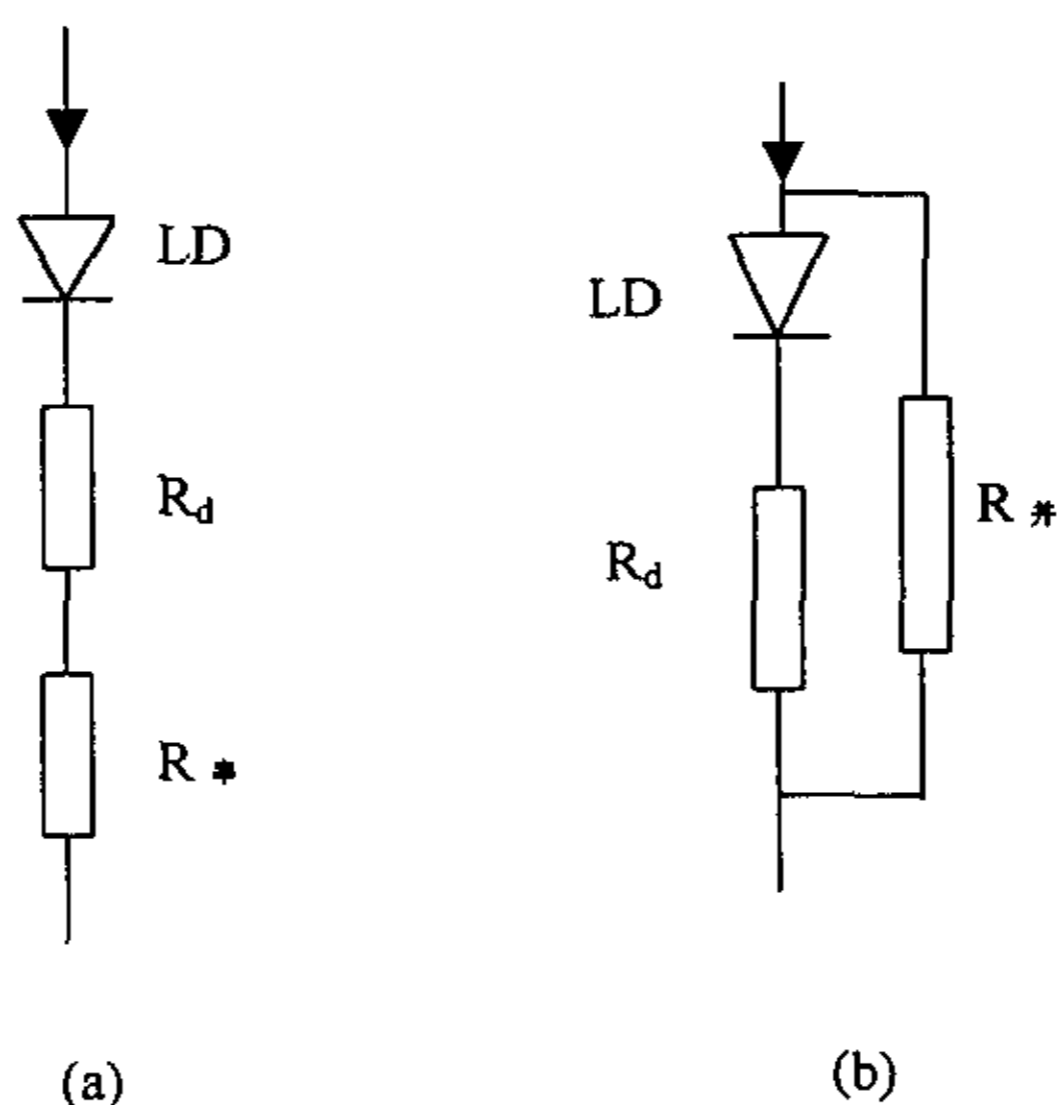


图 3-10 有串(a)并(b)联回路时的 LD 等效电路

表 3-3, 不同阻值电阻的噪声,  $f=2.5\text{Hz}$ , 噪声单位  $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$

	$1\Omega$	$5\Omega$	$10\Omega$	$20\Omega$
$I=20\mu\text{A}$	$1.28\times 10^{-10}$	$2.8\times 10^{-10}$	$4\times 10^{-10}$	$5.7\times 10^{-10}$
$I=5\text{mA}$	$2.46\times 10^{-10}$	$1.05\times 10^{-9}$	$2.10\times 10^{-9}$	$4.20\times 10^{-9}$

与 LD 的初测噪声 (表 3-1, 2 所示) 相比, 电阻引起的噪声要小得多, 所以小的串联电阻一般不会对器件的噪声带来影响。当器件串联非线性回路时, 若非线性回路本身引起的噪声不大 (主要是散弹噪声), 则对器件的噪声影响也不大 (如表 3-1, 2 所示)。

### 3.2.2 并联回路的影响

器件并联不同阻值电阻后的噪声大小如表 3-4, 5 所示。从表 3-4, 5 可以看出, 当  $I=20\mu\text{A}$  时, 并联电阻的存在大大减小了器件的噪声; 当  $I=5\text{mA}$  时, 并联电阻的存在对器件噪声影响不大。

表 3-4,  $I=20\mu\text{A}$  时, 并联电阻对器件噪声的影响 ( $f=2.5\text{Hz}$ , 噪声单位  $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )

管号	$1\Omega$	$5\Omega$	$10\Omega$	$20\Omega$	二极管	初测值
2505	$62.8\mu$	$68.9\mu$	$49.47\mu$	$92.2\mu$	$605\mu$	$9.9\text{m}$
B41	$59.53\mu$	$56.9\mu$	$59\mu$	$51\mu$	$519\mu$	$878.2\mu$
2496	$60.7\mu$	$61.2\mu$	$63\mu$	$61.6\mu$	$587\mu$	$556.6\mu$
13	$64.3\mu$	$63.8\mu$	$65.2\mu$	$74.5\mu$	$601\mu$	$14.68\text{m}$

表 3-5,  $I=5\text{mA}$  时, 并联电阻对器件噪声的影响 ( $f=2.5\text{Hz}$ , 噪声单位  $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )

管号	初测值	$1\Omega$	$5\Omega$	$10\Omega$	$20\Omega$	二极管
2505	$152.23\mu$	$133.3\mu$	$161.5\mu$	$148\mu$	$160.5\mu$	$182\mu$
B41	$625\mu$	$67.8\mu$	$56.9\mu$	$467\mu$	$645\mu$	$644\mu$
2496	$94.6\mu$	$88.62\mu$	$90.1\mu$	$91.2\mu$	$100.6\mu$	$95.68\mu$
13	$141.6\mu$	$90.8\mu$	$158.2\mu$	$140.1\mu$	$150.6\mu$	$177.8\mu$

有并联回路时, 半导体激光器的等效电路如图 3-10 (b) 所示。当  $I=20\mu\text{A}$  时, 器件未导通,  $R_d$  很大, 流过并联电阻的电流占主导地位, 流过 LD 的电流却很小, 此时总的噪声主要是由并联电阻引起的, 而电阻引起的噪声又很小, 所以并联电阻的存在大大减小了器件的噪声。当  $I=5\text{mA}$  时, 器件处于导通状态。器件导通状态下的  $R_d$  很小, 此时总的噪声是由 LD 和并联电阻共同产生的, 但并联电阻引起的噪声很小, 可以忽略, 因此在  $I=5\text{mA}$  时, 并联电阻对器件的噪声影响不大。从表 3-4, 5 中也可以看到, 非线性并联回路对器件噪声影响也不大。

### 3.2.3 串并联回路对器件可靠性的影响

器件存在串联回路的因素很多, 如由欧姆接触不好, pn 结或异质结界面不完善等。这些因素都与器件的可靠性有着密切的关系, 使器件退化较快。而载流子泄漏或表面漏电将造成的器件的并联回路, 使器件的阈值电流增大, 导致器件的量子效率下降, 在老化过程中退化较快。通过上面的分析可知, 并联回路一般会使器件噪声减小, 所以小噪声器件也可能是不可靠器件, 如在对  $980\text{nm}$  双量子阱半导体激光器的噪声测试和老化实验时, 发现有些器件 (如 B20 器件) 的初始噪声很小, 导通前后分别为  $1460\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$  和  $101.6\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ , 但该器件老化后是不可靠器件, 经电导数测试发现该器件有并联回路, 即在电导数曲线上存在初始峰, 如图 3-9 所示。

### § 3.3 异质结界面退化与 1/f 噪声变化

#### 3.3.1 异质结界面退化与谱线宽度增加<sup>[13]</sup>

在器件退化过程中，线宽变化与输出光功率倒数（1/P）间的关系曲线如图 3-11 所示。定义谱线线宽与 1/P 曲线的反向延长线在纵轴上的截距为残余线宽，相当于输出光功率趋于无穷大时的谱线宽度。可见，退化过程中线宽逐渐增加，而且残余线宽也增加。若消除 1/f 噪声的影响，则器件在退化过程中，残余线宽没有变化。从图 3-11 可以看出，消除 1/f 噪声的影响后，阈值电流增加到初始值的 250%时，也没有残余线宽。这说明残余线宽是由 1/f 噪声决定的。在异质结界面退化过程中，一些缺陷增加，导致非辐射复合电流增加，所以阈值的增加主要是由于非辐射复合电流的增加引起的。因此，在异质结界面，1/f 噪声与非辐射复合电流间有着强烈的相关性。

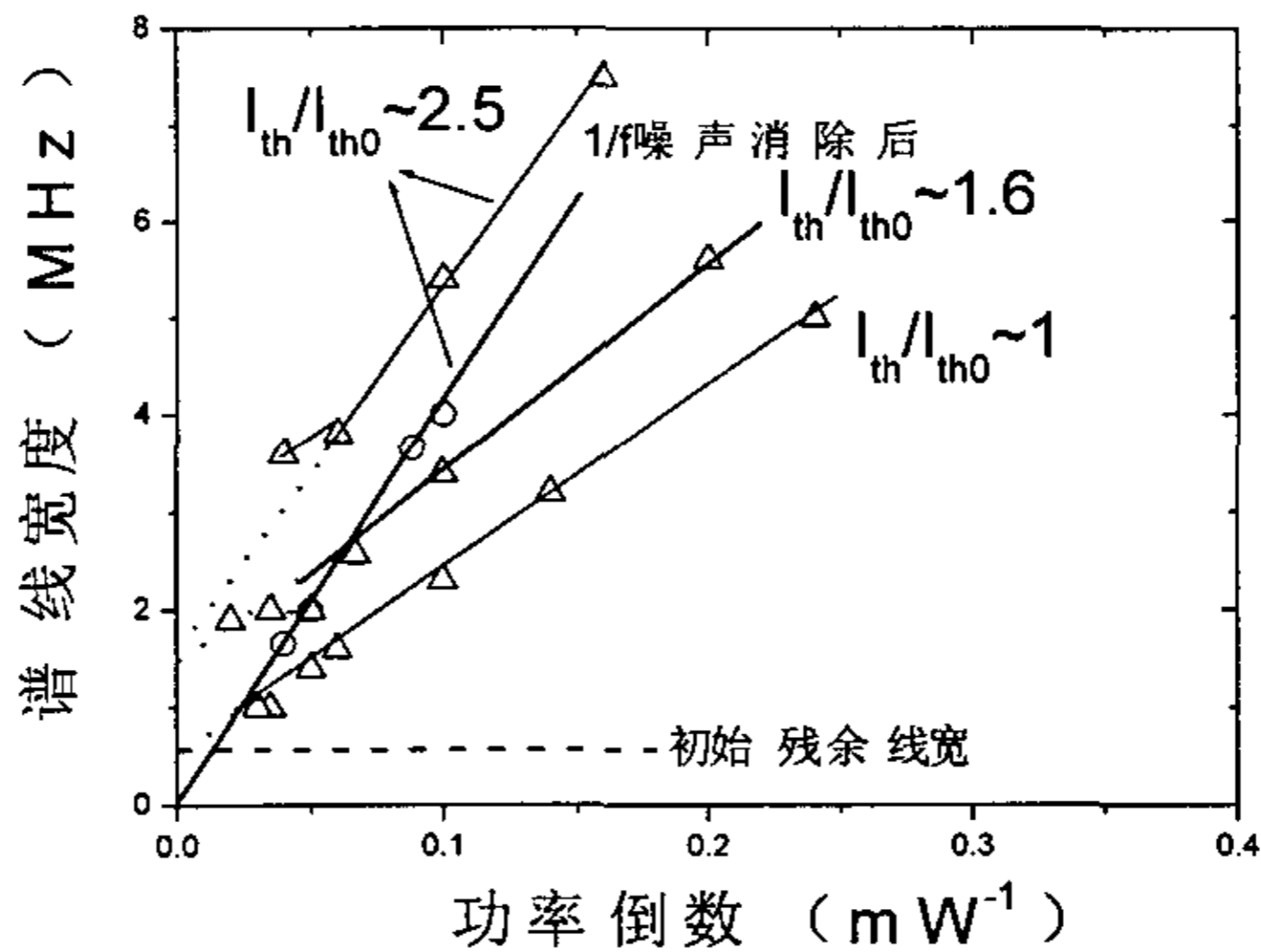


图 3-11 线宽变化与输出光功率倒数（1/P）间的关系曲线

#### 3.3.2 质结界面处 1/f 噪声的来源

在异质结界面处，每单位长度的复合电流  $I_{BH}$  由下式给出<sup>[13]</sup>

$$I_{BH} = q s_0 L_{BH} n_i \exp(qV/2kT) \quad (3.6)$$

式中,  $q$  为电子电量,  $s_0$  为异质结界面处的本征复合率,  $L_{BH}$  为载流子在异质结界面处的扩散长度,  $n_i$  为本征载流子密度。在这些复合过程中, 包括了少数载流子在界面的扩散。则根据 Kleinpenning 提出的模型<sup>[14]</sup>, 非辐射复合电流的噪声谱密度为

$$S_I(f) = \alpha_H q I_{BH} S / 4\omega f \quad (3.7)$$

$\alpha_H$  为胡格系数,  $S$  为界面复合率,  $w$  是载流子限制层的厚度。该式表明, 在异质结界面处存在  $1/f$  噪声源, 进而表明  $1/f$  噪声源来源于异质结周围的表面复合或者是界面位错处的非辐射复合。由非辐射复合电流的  $1/f$  涨落引起的电流噪声调制有源区内载流子的浓度, 使幅度和频率噪声增加。激光器频率噪声谱密度可由下式给出<sup>[15]</sup>

$$S_{FM}(f) = A + K(c/4\pi n_g)^2 \alpha^2 S_I(f) \quad (3.8)$$

式中, 第一项  $A$  代表白噪声, 第二项代表  $1/f$  噪声, 设为  $S_{-1/f}(f)$ 。其中,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $c$  为光速,  $n_g$  为介质的折射率,  $K$  是由有源区体积和增益因子等因素决定的常数。这个方程表明,  $1/f$  噪声的强度无论是在初始阶段还是退化阶段都与异质结界面的质量有关。

在退化过程中, 界面复合率和非辐射复合电流 ( $S, I_{BH}$ ) 逐渐增加, 则器件的  $1/f$  噪声也随之增加。 $1/f$  噪声的增加可以看成是一个比率

$$\frac{S_{-1/f}(f)}{S_{-1/f}(f)_{initial}} = \frac{S_I(f)}{S_I(f)_{initial}} \sim \frac{I_{BH} S}{I_{BHinitial} S_{initial}} \quad (3.9)$$

$S$  的增加是由界面态密度的增加引起的<sup>[13]</sup>, 所以  $S/S_{initial}$  可以近似地被  $I_{BH}/I_{BHinitial}$  代替, 因此

$$\frac{S_{-1/f}(f)}{S_{-1/f}(f)_{initial}} \sim \left( \frac{I_{BH}}{I_{BHinitial}} \right)^2 \quad (3.10)$$

在外延生长时, 不可避免地要在异质结界面上形成各种位错, 如失配位错, 堆垛位错, 空隙, 夹杂物等, 这些位错起着非辐射复合中心的作用, 随机俘获或释放载流子, 使器件中载流子出现涨落。在退化前, 这些非辐射复合中心决定着最初的  $1/f$  噪声和残余线宽。在异质结界面退化过程中, 一些缺陷增加, 导致非辐射复合中心增多,  $1/f$  噪声变大, 残余线宽增加。

### § 3.4 器件 g-r 噪声与内部缺陷

#### 3.4.1 g-r 噪声的分离

一般情况下, g-r 噪声谱常常与  $1/f$  噪声谱叠加在一起, 表现为  $1/f$  噪声曲线上的凸起或驼峰。所以通常根据  $1/f$  噪声谱的凸起或驼峰来识别 g-r 噪声源, 这种方法没有定量结果, 准确度差, 给精确测定 g-r 噪声的幅度和转折频率造成了困难。在存在多重时间常数的 g-r 噪声谱中, 这个问题显得更加突出。这时, 将常规噪声功率谱  $S(f)$  转换为  $fS(f)$  谱来处理更为方便<sup>[16]</sup>。半导体激光器的噪声中含有  $1/f$  噪声, g-r 噪声以及白噪声, 总的噪声的功率谱密度可以表示为

$$S_i(f) = A + \frac{B}{f} + \sum_{i=1}^N C_i \frac{1/f_{0i}}{1+(f/f_{0i})^2} \quad (3.11)$$

式中,  $A$  代表白噪声 (包括散弹噪声和热噪声), 第二项为  $1/f$  噪声, 第三项为 g-r 噪声,  $N$  表示器件具有  $N$  个 g-r 噪声源, 相应的时间常数  $\tau_i = 1/2\pi f_{0i}$ ,  $f_{0i}$  是 g-r 噪声的转折频率, 则

$$fS_i(f) = Af + B + \sum_{i=1}^N C_i \frac{f/f_{0i}}{1+(f/f_{0i})^2} \quad (3.12)$$

假定只有一个 g-r 噪声源, 则上式变为

$$fS_i(f) = Af + B + \frac{Cf}{1+(f/f_0)^2} \quad (3.13)$$

变换后的曲线如图 3-12 所示。

若器件无 g-r 噪声则为曲线 1, 是一条直线, 与纵轴截距为  $1/f$  噪声的幅度  $B$ , 斜率反映了白噪声的大小。若器件有 g-r 噪声则为曲线 2, 峰起反映了 g-r 噪声分量。将  $fS(f)$  对  $f$  求导得:

$$\frac{d[fS(f)]}{df} = A + \frac{d\left[\frac{Cf/f_0}{1+(f/f_0)^2}\right]}{df} = A + \frac{C}{f_0 \left[1+(f/f_0)^2\right]^2} \quad (3.14)$$

显然,  $fS(f)$  在  $f=f_0$  时有极大值。所以 g-r 噪声的峰点位置恰为 g-r 噪声的转折频率  $f_0$ ,  $f_0$  处对应的幅度为  $2C/f_0$ ,  $f_0$  越大则 g-r 噪声的峰起范围越宽, 若器件具有几种 g-r 噪声, 则  $fS(f)$  曲线将有几个峰起。由此可见, 根据  $fS(f)$  曲线可

以得到相应的白噪声 A, 1/f 噪声的幅度 B, g-r 噪声的幅度和频率  $f_0$ , 从而了解 g-r 噪声的特征。

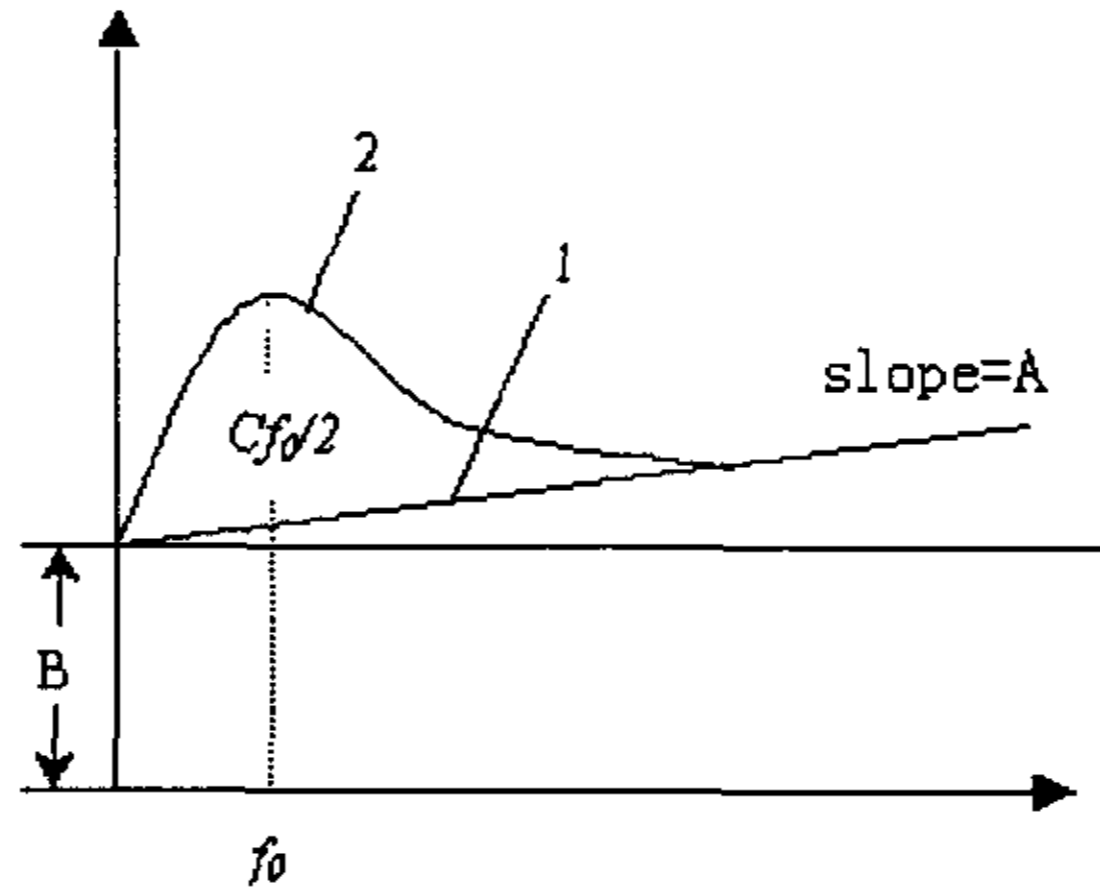


图 3-12  $fS_N(f)$  曲线及噪声成分计算

### 3.4.2 g-r 噪声的特征分析

半导体器件内的 g-r 噪声主要来自自由晶格位错或重金属杂质在禁带中形成的深能级对导带或价带载流子的随机俘获和释放。对于 n 型掺杂半导体主要表现为导带的自由电子的随机起伏, 对于 p 型掺杂半导体为价带的空穴的随机起伏。以 n 型半导体为例, 导带电子起伏  $\Delta N$  的谱密度可以表示为<sup>[17]</sup>

$$S_N(f) = 4\overline{\Delta N^2} \frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.15)$$

式中,  $\overline{\Delta N^2} = N_t \lambda (1 - \lambda)$ ,  $\lambda = \frac{s_-}{s_- + r_n n_0}$ ,  $\tau = \frac{1}{s_- + r_n n_0}$ 。

其中  $N_t$  为缺陷能级密度,  $s_-$  为电子产生率,  $r_n$  为电子俘获率。根据热平衡时, 一切微观过程保持细致平衡<sup>[18]</sup>, 有  $s_- = r_n n_1$ , 其中,

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right), \quad n_1 = B N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right),$$

$N_c$  为导带的有效状态密度,  $B$  为杂质能级的分布函数中简并因子,  $n_0$  为导带电子浓度。于是  $\overline{\Delta N^2}$  和 g-r 噪声频率  $f_0$  为

$$\overline{\Delta N^2} = \frac{BN_i \exp(-\frac{E_F - E_t}{kT})}{\left[1 + B \exp(-\frac{E_F - E_t}{kT})\right]^2} \quad (3.16)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{r_n n_0}{2\pi} \left[1 + B \exp(-\frac{E_F - E_t}{kT})\right] \quad (3.17)$$

为简化起见, 可令  $B=1$ 。由式 (3.16) 可知, 只有当缺陷能级  $E_t$  等于费米能级  $E_F$  时,  $\overline{\Delta N^2}$  最大, 即器件的 g-r 噪声最大, 这时  $\overline{\Delta N^2} = N_i/4$ ,  $f_0 = r_n * n_0 / \pi$ 。

当  $E_t - E_F = \pm 3kT$  时,  $\overline{\Delta N^2} \approx 0.05N_i$ , 即下降为最大值的 20%, 即 g-r 噪声迅速减小。上述分析说明, 对于半导体器件的 n 区 (或 p 区) 内的缺陷, 只有在某一温度下, 使  $E_t \approx E_F$  时, 才有明显的 g-r 噪声。但是, 对于半导体器件的 pn 结区的情况则不同, 由于 pn 结区内建电势差的作用, 使半导体能带在 pn 结区发生弯曲, 如图 3-13 所示。这时, 即使 n 区 (或 p 区) 内缺陷能级  $E_t \neq E_F$ , 但在 pn 结的空间电荷区处仍会产生  $E_t$  与  $E_F$  交叉, 从而在交叉点附近形成  $\Delta N$  起伏及 g-r 噪声。半导体激光器中 g-r 噪声的出现反映了器件内部深能级缺陷的存在。

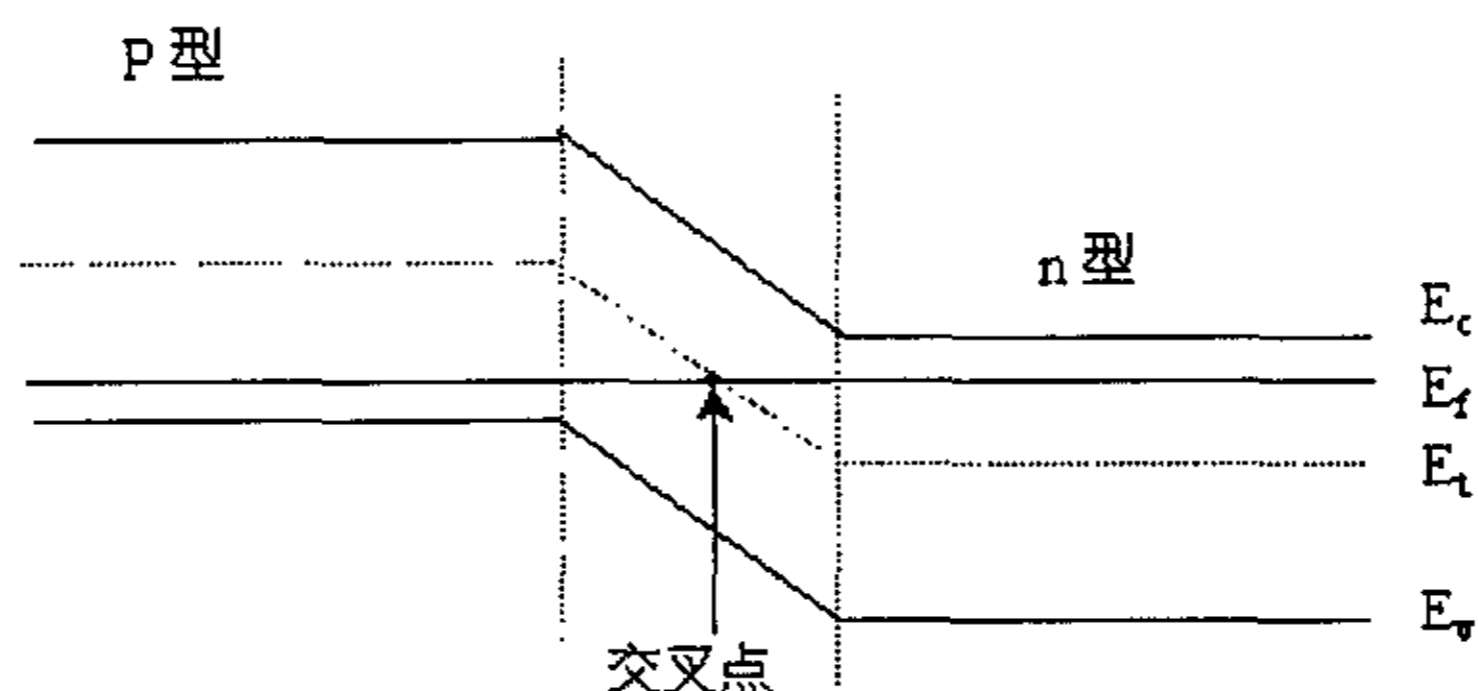


图 3-13 pn 结的能带图

### 3.4.3 半导体激光器中 g-r 噪声和器件的可靠性

#### 1. GaAs/GaAlAs 双异质结半导体激光器中的 g-r 噪声

对 40 只质子轰击型 GaAs/GaAlAs 双异质结半导体激光器进行了噪声电压的功率谱测试, 测试电流为 3mA。然后作出各只器件的  $S_V(f) \sim f$  及  $fS_V(f) \sim f$  曲线,

发现有的器件的  $fS_v(f) \sim f$  曲线上有明显的突起，说明器件存在 g-r 噪声。如 35# 器件的  $S_v(f) \sim f$  及  $fS_v(f) \sim f$  曲线分别如图 3-14 (a) (b) 所示。峰处对应的频率为  $f_0$ ，约为 2.5Hz。35# 器件中 g-r 噪声的存在，表明器件内部存在深能级缺陷，这些缺陷起着非辐射复合中心的作用。在老化过程中，这些缺陷增长，迁移，导致器件量子效率快速降低，阈值变大，输出光功率变小，使器件快退化。图 3-15 (a) 给出了 35# 器件和另外一只器件 (37#) 老化前的噪声谱密度，其中 35# 噪声较大。图 3-15 (b) 给出了两只器件老化前后的驱动电流 (I) 和输出光功率 (P) 的曲线。曲线 (1) 为老化前，(2) 为老化后。在老化前，两只器件的 P-I 曲线差别不大，甚至 35# 器件的 P-I 还要优于 37# 器件的 P-I 特性，但老化后 35# 器件的 P-I 特性明显变坏。所以，从理论分析和实验结果看，存在 g-r 噪声的器件都是质量和可靠性差的器件，在老化过程中表现为快退化。

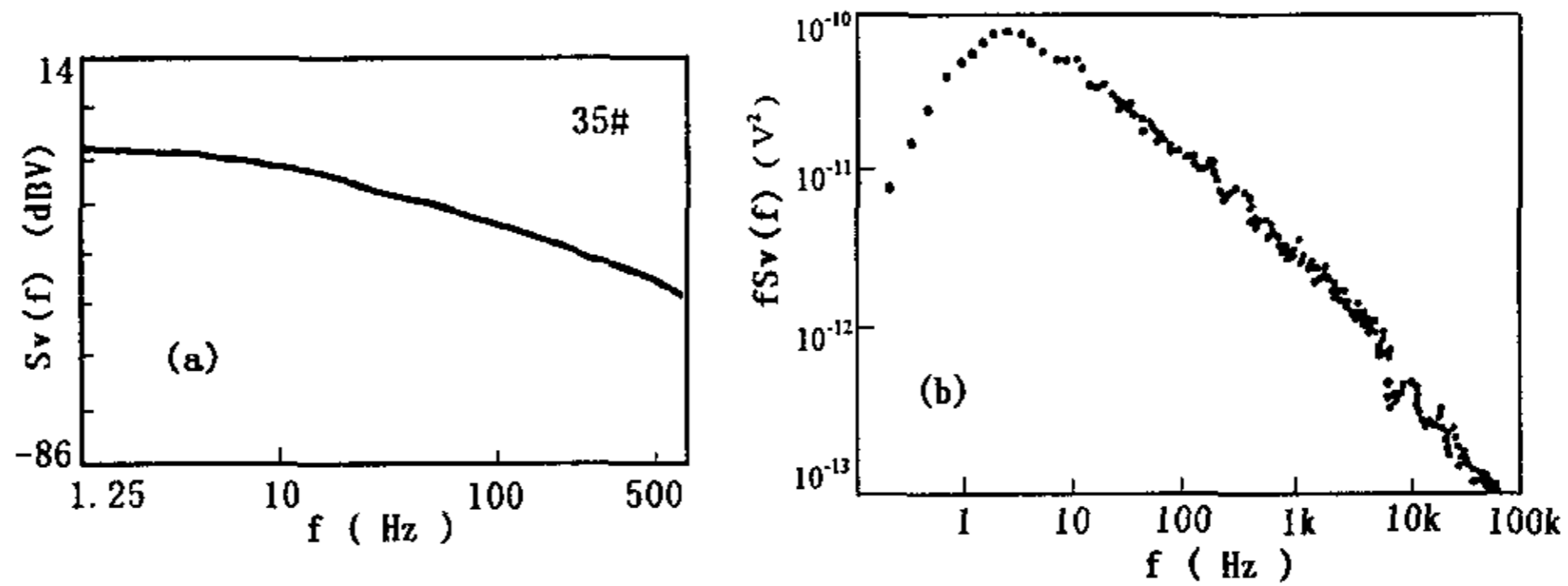


图 3-14  $S_v(f) \sim f$  曲线 (a) 和  $fS_v(f) \sim f$  曲线 (b)

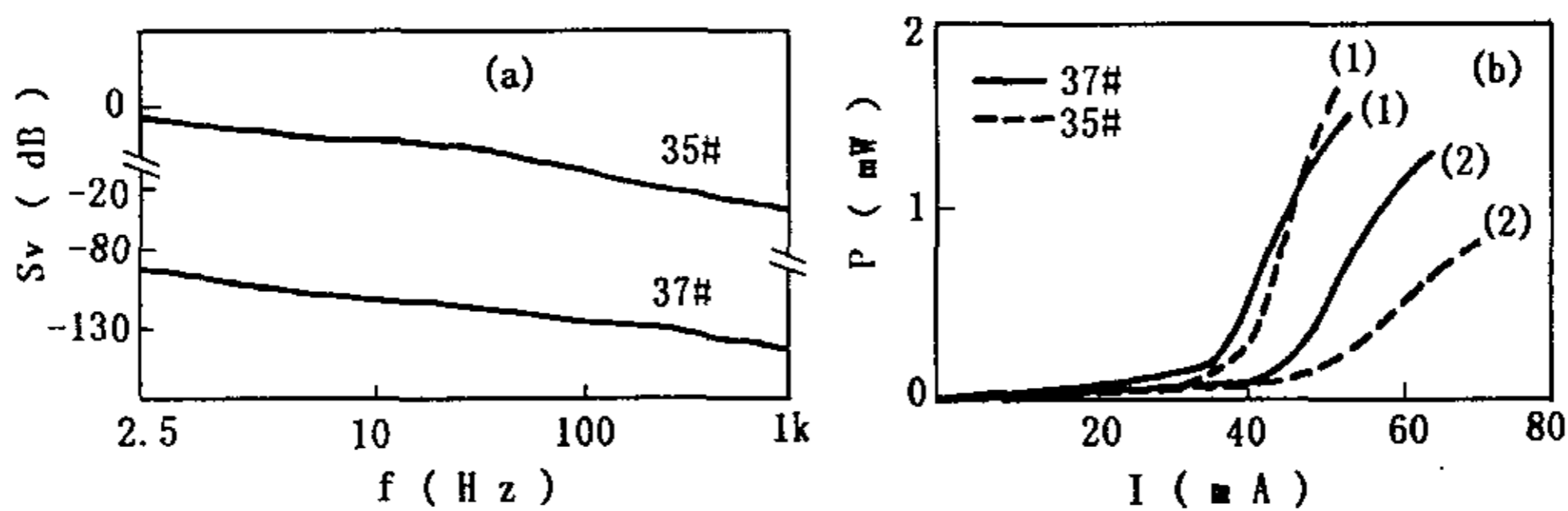


图 3-15 35# 和 37# 器件的  $S_v(f) \sim f$  曲线 (a) 和 P-I 曲线 (b)

## 2. InGaAsP/InGaAs/GaAlAs 双量子阱半导体激光器中的 g-r 噪声

通过对 980nm InGaAsP/InGaAs/GaAlAs 双量子阱半导体激光器的噪声测试发现, 在小注入下, 有的器件的  $fS_V(f) \sim f$  曲线上有明显的峰起, 说明存在 g-r 噪声。且随着注入水平的增加, g-r 噪声又消失, 如图 3-16 所示。

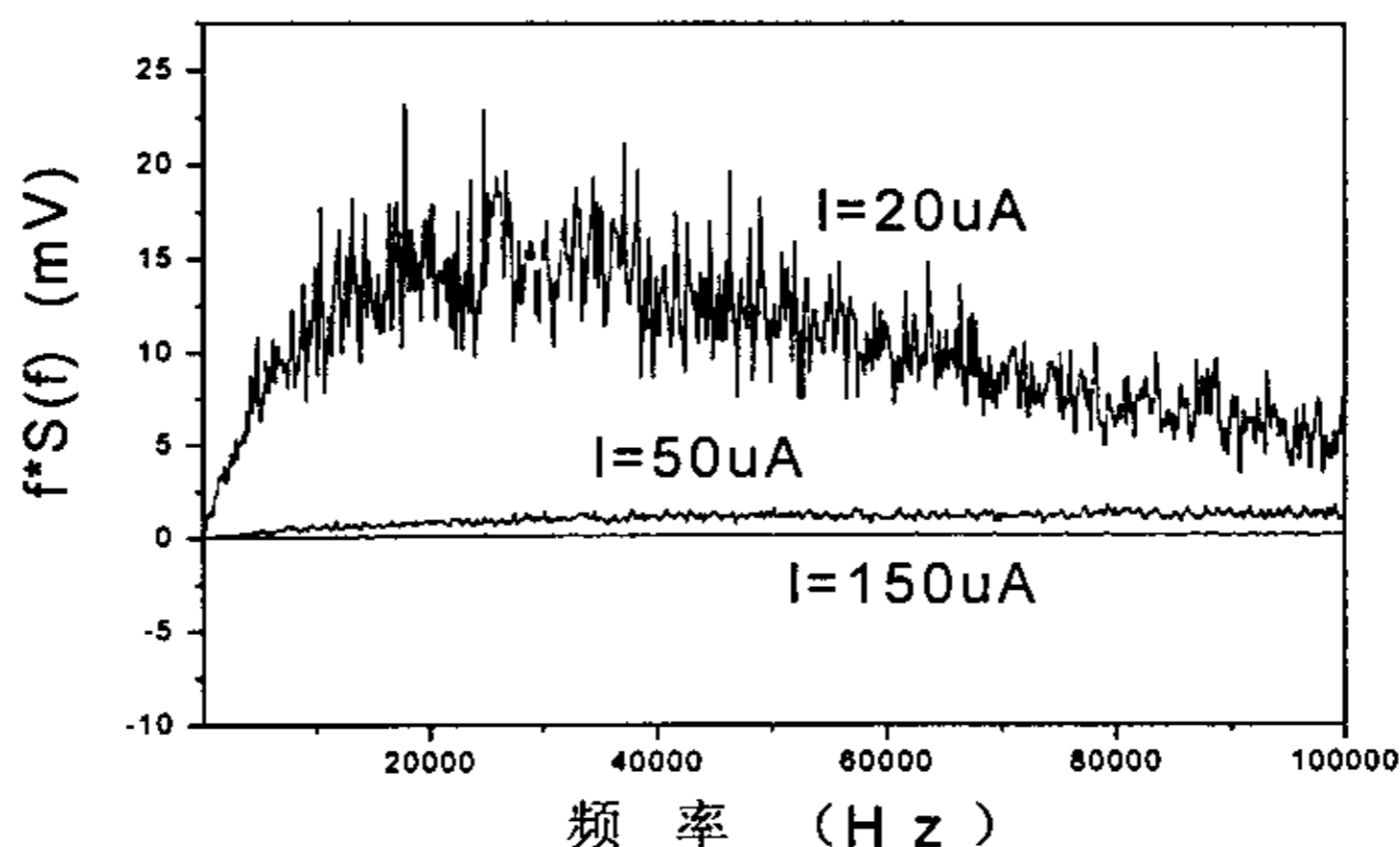


图 3-16 980nm 半导体激光器的  $fS_V(f) \sim f$  曲线

由 (3.16) 式可知, 只有位于耗尽区内的缺陷能级与费米能级有交叉点时, 才对 g-r 噪声有较大贡献, 当缺陷能级远离费米能级时, g-r 噪声迅速减小。pn 结正向偏置时, 外加电压方向与自建场的方向相反, 使 pn 结势垒降低, 耗尽层变窄。同时由于非平衡载流子的注入, pn 结原来的热平衡状态被破坏, 但 p 区和 n 区各自保持热平衡状态, 存在着自己的费米能级, 即准费米能级。在小注入下, 耗尽区较宽, 缺陷能级与准费米能级相交 (如图 3-17 所示), 器件表现出较大的 g-r 噪声。随着注入电流的加大, pn 结势垒降低, 耗尽区变窄, 准费米能级与缺陷能级不再相交 (如图 3-18 所示), 器件 g-r 噪声消失。

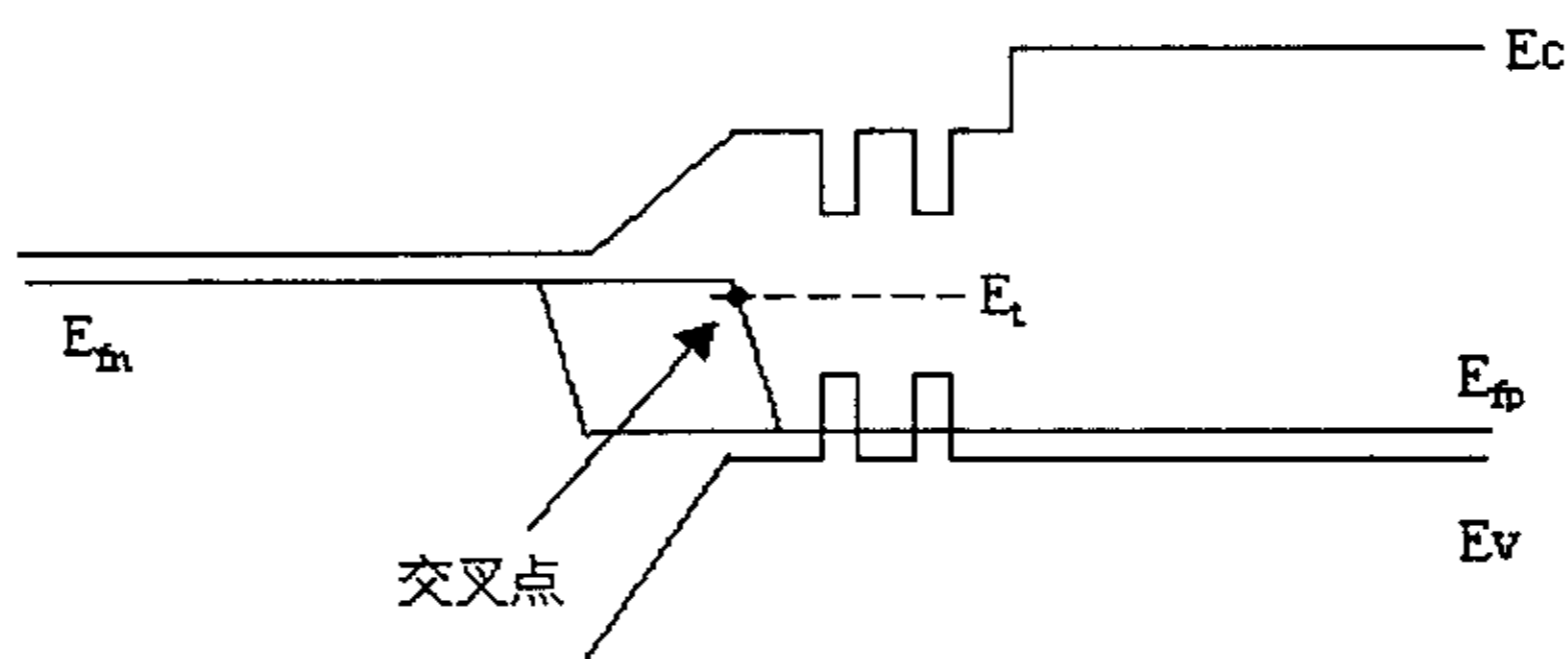


图 3-17 小注入时的 pn 结的能带图

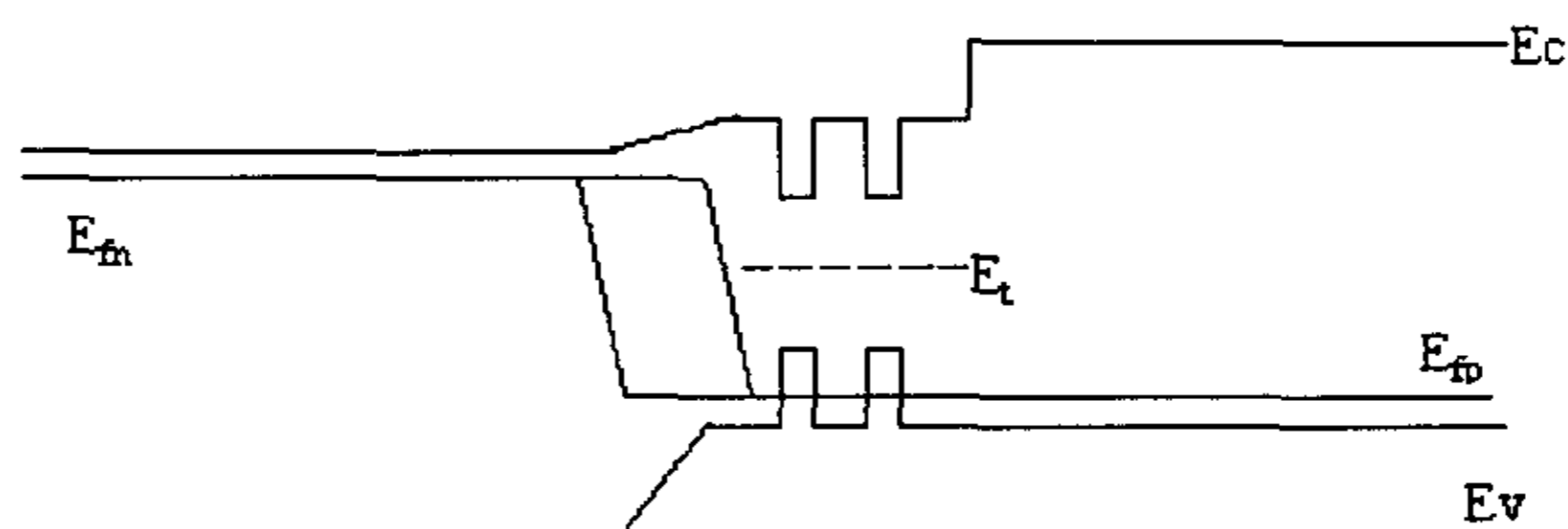


图 3-18 较大注入时的 pn 结的能带图

### § 3.5 应力对半导体激光器噪声的影响

#### 3.5.1 半导体激光器电流噪声的特性

为了更好地了解噪声随注入电流的变化情况,并消除器件动态电阻变化对噪声的影响,我们测量了器件电流噪声的功率谱密度。其中  $I$  取值在  $1\mu\text{A}\sim 100\text{mA}$  之间,小于器件的阈值。被测器件为  $980\text{nm}$  双量子阱半导体激光器,选取表面非辐射复合电流小的器件,以消除表面电流的影响。图 3-19 给出了器件电流噪声的功率谱密度 ( $S_i(f)$ ) 随注入电流( $I$ )的变化情况。从图 3-19 可以看出, $S_i(f)\sim I$  曲线可以分为二段,当  $I < 100\mu\text{A}$  时, $S_i(f)$  与  $I$  成比例,当  $I > 100\mu\text{A}$  时, $S_i(f)$  与  $I^2$  成比例。在  $100\mu\text{A}$  处可能有一个过渡区<sup>[19]</sup>,但在我们这里不明显。

半导体激光器可以看成由有源区和非有源区(串联电阻)两部分构成。忽略表面电流的影响,在阈值以下器件噪声主要来自于器件的结区(有源区)和串联电阻。不同噪声源所引起的噪声随注入电流的变化情况也不相同。根据胡格的经验公式,由串联电阻引起的噪声 ( $S_i(f)$ ) 与注入电流的平方 ( $I^2$ ) 成比例<sup>[20]</sup>,即

$$S_i = \alpha I^2 / fN \propto I^2 \quad (3.18)$$

$\alpha$  是常数,  $N$  为载流子的平均数,  $I$  为注入电流。

Kleinpenning 提出的扩散噪声模型认为器件在小注入的噪声主要来源于结区扩散电流的涨落<sup>[14]</sup>,与电流的一次方成比例,此时

$$S_i(f) = \alpha q I / (4f\tau) \propto I \quad (3.19)$$

$q$  是电子电荷,  $\tau$  有源区内载流子的寿命。

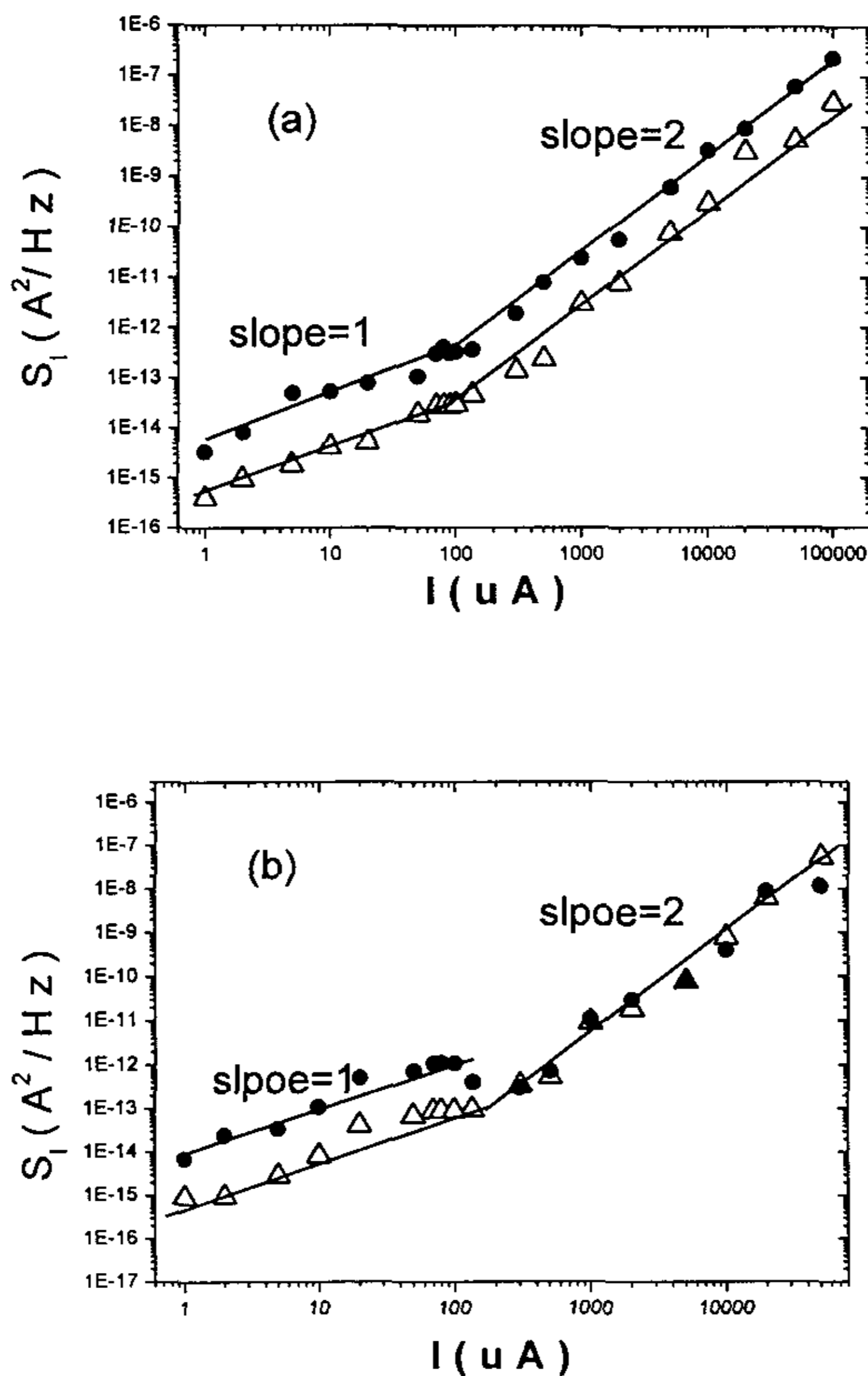


图 3-19 应力前后噪声的变化

当  $I < 100 \mu A$  时,  $S_i(f)$  与  $I$  成比例, 这与 Kleinpenning 提出扩散噪声理论正好相符。在双量子阱激光器中, 注入的载流子通过扩散进入量子阱区, 并通过隧道效应被收集到各个量子阱中。在小注入下, 器件的导通电流与下述诸多因

素有关：载流子的扩散过程，量子阱中带间的自发复合速率，界面、表面以及器件内部缺陷引起的非辐射复合速率和不同量子阱间载流子的隧道效应。这与通常的 pn 结中的扩散过程是一致的。当  $I < 100 \mu\text{A}$  时，串联电阻上的压降很小，其引起的噪声同样很小，可以忽略，对噪声的主要贡献来源于扩散过程，所以  $S_i(f)$  与  $I$  成比例。在较大注入 ( $I > 100 \mu\text{A}$ ) 下，串联电阻上的压降不能忽略，成为噪声的主要来源，所以  $S_i(f)$  与  $I^2$  成比例。

### 3.5.2 应力对半导体激光器噪声的影响

对 980nmLD 在  $70^\circ\text{C}$  400mA 下进行老化 200 小时，选取 V-I 特性变化明显的器件再进行噪声测试。实验结果发现，当  $I < 100 \mu\text{A}$  时，所有器件在应力实验后的噪声都变大。当  $I > 100 \mu\text{A}$  时，有的器件在应力实验后噪声变大，而有的器件的噪声却没有明显变化。不论是  $I < 100 \mu\text{A}$  还是  $I > 100 \mu\text{A}$ ，应力实验前后，噪声随电流的变化规律没有发生变化。图 3-19 给出典型的实验结果。

由前面的分析可知，在小注入下，器件噪声与结区（有源区）的质量密切相关。器件中的晶格缺陷，深能级复合中心，表面态以及界面态都起着非辐射复合中心的作用，是器件噪声的重要来源。在应力实验过程中，这些缺陷增长，攀移，导致非辐射复合中心增多，使载流子寿命减小，器件噪声变大。所以，小注入 ( $I < 100 \mu\text{A}$ ) 下器件噪声在应力实验后变大。在较高注入下，串联电阻引起的噪声是主要的。在应力实验过程中，如果串联电阻中没有缺陷的增长，由此引起的噪声则没有变化（如图 3-19 (b) 所示）。相反，如果非有源层（串联电阻）的质量不好，那么在热老化过程中，串联电阻中的缺陷增长，导致噪声增加（如图 3-19(a) 所示）。

## § 3.6 小结

本章对半导体激光器噪声与器件质量的相关性方面做了论述。分析并测量了腔面处理、串并联回路、内部缺陷、应力以及界面退化对器件噪声的影响。

1. 腔面钝化使器件的噪声减小，而腔面腐蚀、 $\text{Na}^+$  沾污后，器件噪声明显变大。表面态是  $1/f$  噪声的一个重要来源，腔面处理后，表面态数量的改变是器件噪声发生变化的主要原因之一。腔面状况的改变也调制了器件的 I-V 特性，特别是小电流下的 I-V 特性变化明显。我们也讨论了小电流下器件噪声与表面电流的相关性。对于多数器件，在小电流状态下，器件噪声大则表面电

流大，反之亦然。

2.若串联回路本身引起的噪声很小，则其对器件的噪声影响不大。并联回路使器件在小注入下的噪声变小，而对器件在较大注入下（器件导通）的噪声影响不大。

3.内部缺陷的存在是器件 g-r 噪声的重要来源。但只有与费米能级相交的缺陷能级才对 g-r 噪声有较大贡献。在小注入下，耗尽区较宽，缺陷能级与费米能级相交的几率大，易出现 g-r 噪声，随着注入水平的加大，耗尽区变窄，缺陷能级将位于耗尽区以外，此时 g-r 噪声消失。有 g-r 噪声的器件通常都是不可靠器件。

4.器件在小注入下的噪声对应力敏感，而在较高注入下，有的器件的噪声对应力敏感，有的器件却不敏感。

5.激光器输出光信号的残余线宽主要是由  $1/f$  噪声引起的。界面处的非辐射复合中心决定着最初的  $1/f$  噪声和残余线宽。在界面退化过程中，一些缺陷增加，导致非辐射复合中心增多， $1/f$  噪声变大，残余线宽增加。

#### 参考文献

- [1] F.R.Gfeller and D.J.webb. Degradation and lifetime studies of high-power single-quantum-well AlGaAs ridge Lasers. J.Appl.phy. 1990, 68(1),14-20.
- [2] Jantsch O. and Feigt I.  $1/f$  noise observed on semiconductor surfaces. Phys. Rev. Lett. 1969, 23, 912-913.
- [3] G.Beister; J.Maege; G.Ebert et al. Non-radiative current in InGaAs/AlGaAs laser Diodes as a Measure of Facet stability. Solid -State Electron. 1998, 42(11), 1938-1945
- [4] Dechiaro L.F. and Sandroff E.J. Improvements in Electronstatic Discharge Performance of InGaP Semiconductor Lasers by Facet Passivation. 1992, IEEE Trans. Electron Devices. 39, 561-565.
- [5] Kamiyama s, Mori Y, Takahashi Y et al. 1991, Appl. Phys. Lett. 58, 2595
- [6] Mcwhorter A.L. Semiconductor surface physics. Philadelphia: Universssity of Pennsylvania Press, 1957.
- [7] Zimmerman N. M. and Webb W. W.  $1/f$  resistance noise complements and anelasticity measurements of hydrogen motion in amorphous  $Pd_{80}Si_{20}$ . 1990,Phys. Rev. Lett. 65, 1040-1043
- [8] 胡贵军, 石家纬, 张素梅等. 激光器电噪声和非辐射复合电流的相关性. 2001,半导体光电, 22 (1) , 12-14.
- [9] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Shumei, Zhang Fenggang. Correlation between the low- frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and

- devices surface non-radiative current. Microelectronics Reliab. 已接收。
- [10] Shi Jiawei; Jin Enshun; Li Hongyan et al. The characteristic junction parameter of a semiconductor laser and its relation with reliability. Optical and Quantum Electronics. 1996, 28, 647-651.
- [11] Motchenbacher, Fitchen. Low-noise electronic design. John Wiley & Sons, Inc. 1973
- [12] 戴逸松, 微弱信号检测方法及仪器, 北京, 国防工业出版社, 1994, 41.
- [13] Mitsuo Fukuda, Takuo Hirono, Takeshi Kurosaki et al. 1/f noise behavior in semiconductor laser degradation. 1993, IEEE Photonics Technology Lett. 5(10), 1165-1167.
- [14] Kleinpenning T.G.M. 1/f noise in P-N diode. Physics, 1980, 98B, 289~299
- [15] M. Ohtsu and S. Kotajima. Derivation of spectral width of 0.8  $\mu$  m AlGaAs laser considering 1/f noise. 1984, Japan. J. Appl. Phys. 23, 760-764.
- [16] Yi Song Dai. Deep-level impurity analysis for p-n junction of a bipolar transistor from low-frequency g-r noise measurement. 1989, Solid-state Electron. 32(6), 439-443.
- [17] A. Van der Ziel. Noise: sources, characterization, measurement. Prentice-hall, Inc. Englewood Cliffs. N.J. 1970, 108-109.
- [18] 王长安, 半导体物理基础, 上海, 上海科学技术出版社, 1985, 105-106
- [19] X.Y.Chen, A. Pedersen, A.D. van Rheezen. Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes. 2001, Microelectronics Reliab. 41, 105-110.
- [20] Hooge. 1/f noise is no surface effect. 1969, Phys. Lett. A-29, 139

## 第四章 噪声用于半导体激光器可靠性评估和筛选

### § 4.1 半导体激光器的可靠性

#### 4.1.1 半导体激光器的可靠性概述

半导体激光器的可靠性是指在一定的条件和时间里所具有的某种性能或完成一定功能的能力,而可靠性通常由其在正常工作条件下的寿命来衡量。与可靠性相矛盾的是退化和失效。半导体激光器与其他半导体器件一样也存在退化现象,即随着工作时间的延续、器件性能变差,甚至于失效。与其它元器件相比引起退化的原因除温度和环境影响外,对半导体激光器来说更为特殊的原因是由有源区中高的光功率密度( $10\text{mW}/\mu\text{m}^2$ 以上)及谐振腔劣化所引起。概括起来,其退化有以下特征:(1)阈值电流  $I_{\text{th}}$  增加,这是主要的特征。这种变化与器件的工作寿命密切相关,一般来说阈值增加速率越快其寿命越短;(2)微分量子效率减少,  $P$ (光功率)- $I$ (电流)曲线出现扭折;(3)光束图像发生变化;(4)调制特征变坏,这是由于退化产生高频自激振荡所引起的。此外,光谱也会发生变化。因此,研究半导体激光器的可靠性及其规律对改善其性能和正确使用器件有重要意义。

半导体激光器的性能在工作过程中产生退化。这种退化通常是阈值升高并伴随着外微分量子效率下降。退化的主要机理在于生产过程中的外延、器件工艺、焊接等步骤。另外,来自同一外延片的器件的退化率依赖于工作条件,即电流、温度。半导体激光器在一些场合应用要求必须有足够长的工作寿命,如海底光纤通信、卫星通信等所需器件的工作寿命应有 20-25 年。在系统运转周期内更换激光器的代价将是巨大的,甚至是不可能的。因此,必须建立一套科学的筛选和预测寿命的方法。这种可靠性保证措施的研究将给器件的使用提供必要的依据。

#### 4.1.2 影响半导体激光器可靠性的主要因素

影响半导体激光器质量和可靠性的主要因素可分为以下几个方面:1 缺陷在有源区内形成 2 腔面损伤 3 非辐射复合与内部吸收的影响 4 电流限制结退化 5 欧姆接触退化与焊料变质

##### 1. 缺陷在有源区内形成

半导体激光器工作在高电流密度下,产生大量电子空穴对、热梯度、潜在的应力场、有源区内的大量非辐射复合。这些因素促进了孤立的缺陷运动、增

加、生长成簇。从而使半导体激光器性能明显退化<sup>[1]</sup>。

大量的研究表明,有源区中存在大的位错网络是缩短器件寿命的主要原因。位错网络是非辐射区,不仅不产生光而且吸收光。这些位错网络是器件工作期间由初始存在的位错生长而来,被称之为暗线缺陷(DLD)。此外还有暗点缺陷(DSD)<sup>[2]</sup>。这些初始位错来自三个方面:一是衬底中的位错在外延生长及工作期间延伸到有源区;二是外延生长时形成的位错,尤其是在异质结界面上,失配位错、堆垛位错、空隙、夹杂物等容易产生;三是工艺过程中引入的缺陷,如选择性 Zn 扩散引入条形区小的位错环,以及解理时所造成的机械损伤等。

通常认为晶体缺陷形成过程与非辐射的电子-空穴复合有关。非辐射复合所释放出的能量被晶格吸收,促进缺陷发生攀移和滑移。当器件中有强的应力存在时将促使其进一步加速运动。

点缺陷的存在可能对器件长期慢退化产生不利影响,而且有源区内点缺陷的生成速率将最终决定器件的寿命。点缺陷的种类繁多,如占据镓位置的砷和空位镓,占据砷位置的镓和空位砷,以及间隙位置的镓和砷。其中间隙原子的存在影响很大。

此外,有些杂质元素的掺入也会产生影响。例如铜原子是作为晶格间隙原子而存在,并能迅速移动。它是深能级杂质,是载流子的陷阱。氧使晶格发生紊乱。锌扩散方法和分布状况对器件退化也有影响,有源区重掺锌可产生许多缺陷,使器件迅速退化。

## 2. 腔面损伤

激光器两端腔面损伤可分为两种情况。第一种称之为腔面灾变损伤。主要是高能量密度的光使腔面微区熔融、破裂。原因是接近表面的光吸收造成的。此外,表面复合使腔面处电流密度增加,产生局部发热也能使腔面退化。腔面灾变损伤从根本上降低了腔面反射率,从而增大了阈值电流  $I_{th}$ , 并导致微分量子效率降低。第二种是腔面的化学腐蚀,特别是光化学作用,使激光器在长期工作中发生表面氧化并在腔面上形成点缺陷。

## 3. 非辐射复合与内部吸收的影响

这种影响主要有两种情况:(1)带间俄歇(Auger)效应。大量研究表明,俄歇复合过程使阈值电流具有很强的温度依赖性。在决定窄带隙半导体的光发射器件性能时,俄歇效应是一个重要的因素,它对可见光到  $12\mu\text{m}$  波长范围

内的器件都有影响。这种效应对激光器的寿命起着不利作用。(2)价带内的带间吸收的影响。由于这种吸收使阈值电流增加,微分量子效率降低,从而使器件寿命变短。这些吸收损耗随温度的升高而增加,从而使阈值电流  $I_{th}$  增加,特征温度  $T_0$  变小。

#### 4. 电流限制结退化

折射率导引掩埋结构半导体激光器,用反偏结把电流限制在有源区内,在正常工作条件下,限制结内产生缺陷,降低了这些结对电流的限制能力,阈值因此显著增加。

许多高性能的半导体激光器采用电流限制结构,以使大部分电流流过有源区。有效的电流限制是获得低阈值和高输出功率所必须的。掩埋异质结构的一种退化模式是漏电流增加(电流从有源区外流过),这导致器件阈值电流增大、外微分量子效率降低。

漏电流的增大通常伴有 I-V 特性的软开启。显著特点是在  $I_dV/dI \sim I$  曲线上小电流处有初始峰,这表示存在一并联电阻通道。电流限制结的缺陷通常用 EBIC 技术来观察<sup>[3]</sup>。

#### 5. 欧姆接触退化与焊料变质

半导体材料与欧姆接触金属之间接触不良,界面状态不稳定是欧姆接触退化的主要原因。而焊料(主要是 In)变质常会引起热阻增加。

对 GaAlAs/GaAs DH 激光器,所用焊料主要有纯铟纯锡、金锡易熔合金以及金锗易熔合金等。从老化特性来看,In 焊料应力较小,但老化期由于 In 变质而成为一个退化源。In 变质造成热阻增加,从而使激光器性能衰退。

其热阻增加率定义为:  $\gamma = (R_T(t) - R_T(0)) / (R_T(0) * t)$

式中  $t$  为老化时间;  $R_T(t)$  为老化时间为  $t$  时的热阻;  $R_T(0)$  为开始时的热阻。用 Au-Sn 焊料制作的激光器在 70℃ 输出 5mW/单面时的老化结果表明,驱动电流的增加较用 In 焊料的激光器小,平均热阻为 30℃/W。采用 Au-Ge 焊料在 70℃ 输出 4mW 的老化条件下,工作时间大于 1000 小时,驱动电流仅有微小增加,老化期间热阻几乎为常数。热阻的增加会限制激光器的寿命。

已发现用 Au-Sn 焊料制作的 InGaAsP/InP 激光器,在长期工作之后会变质,生成 Sn 的晶须或与激光器芯片有源层以下界面发生冶金学反应,从而导致器件迅速退化。焊料变质使应力增加、热阻变大,为克服这一缺点采用 Pb(Pb:40

°C/W)-Sn 焊料，得到了较为理想的效果。

### 4.1.3 半导体激光器可靠性的研究方法

#### 1. 加速电老化预测寿命

可靠性保证通常由高应力(例如，高温、大电流)老化实现，这样加速老化可以在数百小时内观测到器件的退化情况。正常情况下的退化率可由高温退化率确定的激活能来得到。

半导体激光器会以多种方式失效，其中包括：(1)早期失效。这种失效通常是激光器中的 DLD 或 DSD 缺陷生长导致在运转之后短时间内迅速退化、失效。反映出制造工艺中的质量问题。具有早期失效的样品对热加速老化比较敏感。(2)随机失效。这是由于外部因素如静电放电、工作应力(大的电流波动、机械振动等)引起的灾变损坏。(3)缓慢磨损失效。这是由于损耗，疲劳，磨损等原因使器件在工作过程中逐步退化，直到器件失效，是器件工作寿命的最后终止。其特点是激光器的特性参数(如阈值电流或输出光功率)随时间缓慢变化。通常可以用在苛刻条件下监视特性参数的方法来预言失效时间或工作寿命。

尽管半导体激光器的失效规律比较复杂，但大量的研究表明，通常可用升温加速老化的办法来检查早期失效，而缓慢磨损失效时间可以用对数正态规律来描述<sup>[4-6]</sup>。

许多电子元器件在正常工作条件下直接测量寿命时间太长，以至于无法进行。半导体激光器件也不例外。为此必须设法建立在短时间内确定缓慢退化产品可靠性的方法，这就是加速老化。所谓加速老化就是在苛刻条件下或在过应力状态下加速器件的退化，然后将在苛刻条件下得到的可靠性数据外推，从而得到正常工作条件下的寿命。这样就能在半导体激光器进入使用期之前对其可靠性有一个合理的较精确的估算或至少有一个大概的界限。

半导体激光器的筛选及寿命的测定通常采用高温加速老化的方法。值得特别指出的是高温加速老化的退化机理应该与低温(工作温度)下的退化机理相同，只有这样所得出的结论才是可靠的。有幸的是半导体激光器在大多数情况下是与之相符的。

器件寿命  $\tau$  与温度  $T$  存在如下指数关系

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a / k_B T) \quad (4.1)$$

其中  $E_a$  为激活能,  $T$  为温度,  $\tau_0$  为一常数,  $k_B$  是玻尔兹曼常数。

从样品中抽样测量其退化参数后预言器件的可靠性或寿命是一种基本的方法。从式(4.1)知, 欲测激光器的寿命必须首先获知激活能。假定半导体激光器的退化为单一磨损方式, 则其符合 Arrhenius 规律即

$$R = R_0 \exp(-E_a / k_B T) \quad (4.2)$$

式中  $R$  为退化率。一般以维持恒定的输出光功率来考查工作电流随时间的退化率。测定不同老化温度下的退化率即可得到样品的激活能。

$$E_a = k_B T_1 T_2 / (T_2 - T_1) * \ln(R(T_2) / R(T_1)) \quad (4.3)$$

此外, 平均失效时间(MTTF)也是衡量半导体激光器可靠性的重要参数。正常工作温度下的 MTTF 值也是通过测定高温老化条件下的平均失效时间和激活能  $E_a$ , 然后由式(4.1)计算得到。而高温老化条件下平均失效时间的测定是以维持单面输出某一固定的功率, 电流增加 50% 作为失效标准的。这种加速老化在不改变退化机理的前提下, 是最客观的。但这种方法时间长, 而且老化后器件已失效, 只能研究器件寿命情况, 不能作为预测和筛选工具。

器件出厂寿命预测(半导体激光器的筛选方法)通常沿用一般半导体器件的筛选方法——用电老化的方法把老化期间在恒定工作电流下输出光功率变化大的器件或在恒定输出光功率下驱动电流变化大的器件筛选掉。即用短时间(通常为 48 小时或 72 小时)加速老化的办法, 考核器件在这段时间内输出光功率退化(恒流老化)或驱动电流增加(恒功老化)用外推公式算出常温下某输出功率下的器件使用寿命。这种方法速度慢, 并容易对器件造成损伤。

## 2. 半导体激光器电导数测试技术

电导数(V-I 关系的一阶导数与电流 I 的乘积)可以用来研究半导体激光器结特征参量、结电压饱和特性、并联漏电通道、载流子泄漏、串联线性电阻、非线性电阻(欧姆接触质量)、电流扩展、非辐射复合中心等与器件质量和可靠性密切相关的因素。根据这些参数和曲线不但可以评价半导体激光器可靠性、预测器件寿命, 还能对器件进行可靠性筛选<sup>[7]</sup>。

典型电导数曲线如图 4-1 所示。由电导数曲线可以给出器件的阈值电流  $I_{th}$

(曲线下沉位置), 串联电阻  $R_s$  (阈值前曲线斜率), 阈值前曲线的延长线在纵轴上的截距可给出器件的结特征参量  $m$  (由  $mkT/q$  计算出, 其中  $k$  为玻尔兹曼常数、 $T$  为测试温度、 $q$  为电子电量), 阈值后曲线延长线在纵轴上的截距  $b$ , 曲线在阈值处的下沉高度  $h$  等一系列与可靠性密切相关的参数<sup>[8-10]</sup>。

通过研究半导体激光器的质量和可靠性与电导数曲线及参数之间的内在联系, 可以快速、无损、方便、有效地把不合格器件筛选出去。

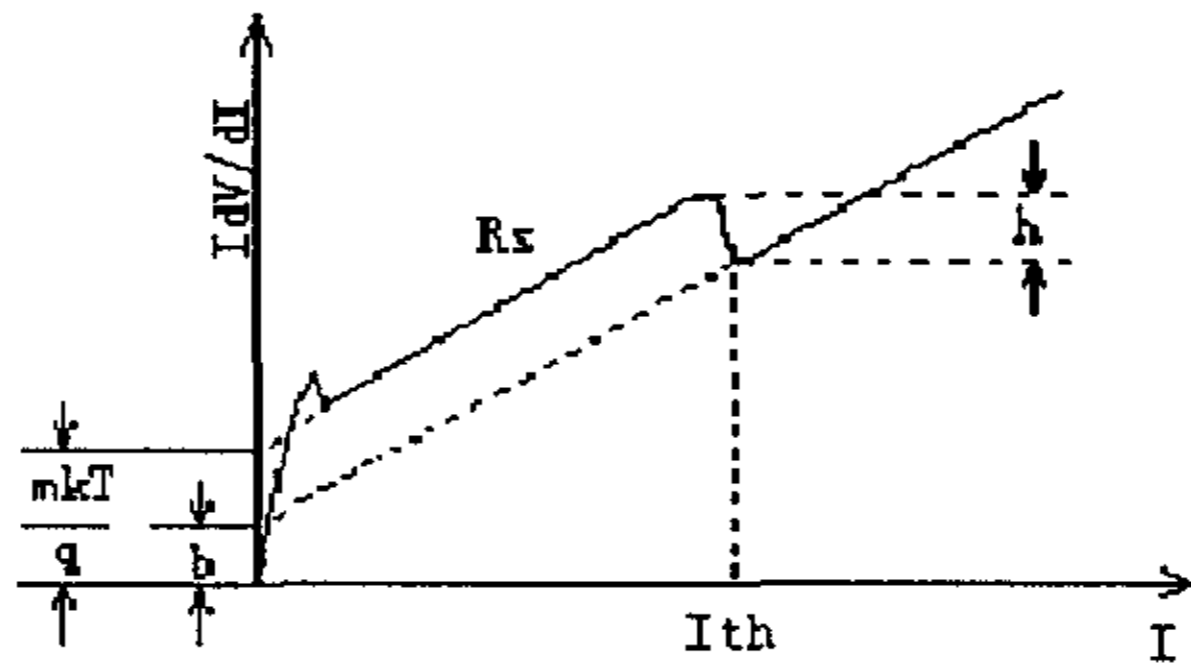


图 4-1 典型电导数曲线

### 3. 噪声用于半导体激光器可靠性评价

众多研究结果表明, 影响器件可靠性的因素往往也是器件产生过剩噪声的主要来源, 器件噪声的大小与器件的质量和可靠性密切相关。所以, 随着对噪声研究的进一步深入, 噪声正成为半导体激光器可靠性评价和筛选的一种简单而有效的新手段<sup>[11-17]</sup>。它具有下列特性:

1. 普遍性。几乎所有的器件都能观察到电噪声现象。电噪声根据其形成机理可分为白噪声和过剩噪声。其中, 白噪声与频率无关, 主要由材料或器件的本征性质决定; 过剩噪声则在低频下显著, 亦称低频噪声, 包括  $1/f$  噪声和  $g-r$  噪声, 主要由材料或器件的不完整性决定。大量的研究已经证明, 绝大多数不完整性(尤其是潜在缺陷)的存在都会引入过剩噪声, 而且噪声大的器件, 可靠性必然差。

2. 敏感性。噪声实际上是系统偏离平衡状态程度的一种度量。当器件的晶格结构、电子状态或杂质分布随时间的延伸或受应力的作用而缓慢变化时, 噪

声将增加，而且其变化量要比其他参数（如漏电流，理想因子等）的变化大的多。在同一设计和工艺条件下同批制造出来并已通过了常规检验的器件中，噪声的差距却很大，这就是噪声对于杂质、缺陷和损伤敏感性的一个佐证。

3. 非破坏性，并可对单个器件进行检验。噪声测试所加的电流或电压，接近或远远低于器件的正常工作应力水平，对器件无任何破坏性。通常用于可靠性评估的加速寿命实验方法，需要加高温或强应力，难免给器件带来损伤；而且，它是针对从大批器件中随机抽样得到的少数器件进行的，获得的是统计结果，具有一定的不确定性。而噪声却可以对单个器件的可靠性作出评价。

正是由于以上的突出优点，噪声用于器件可靠性评价和筛选已得到了国外学者的广泛关注，正成为器件可靠性评价和筛选的一种新方法。

## § 4.2 噪声与器件可靠性的相关性研究

### 4.2.1 实验<sup>[14]</sup>

室温下，测试 40 余只 980nm 双量子阱大功率半导体激光器的低频电噪声，器件结构如图 4-2 所示。器件阈值的典型值为 120mA，斜率效率为 0.6W/A。

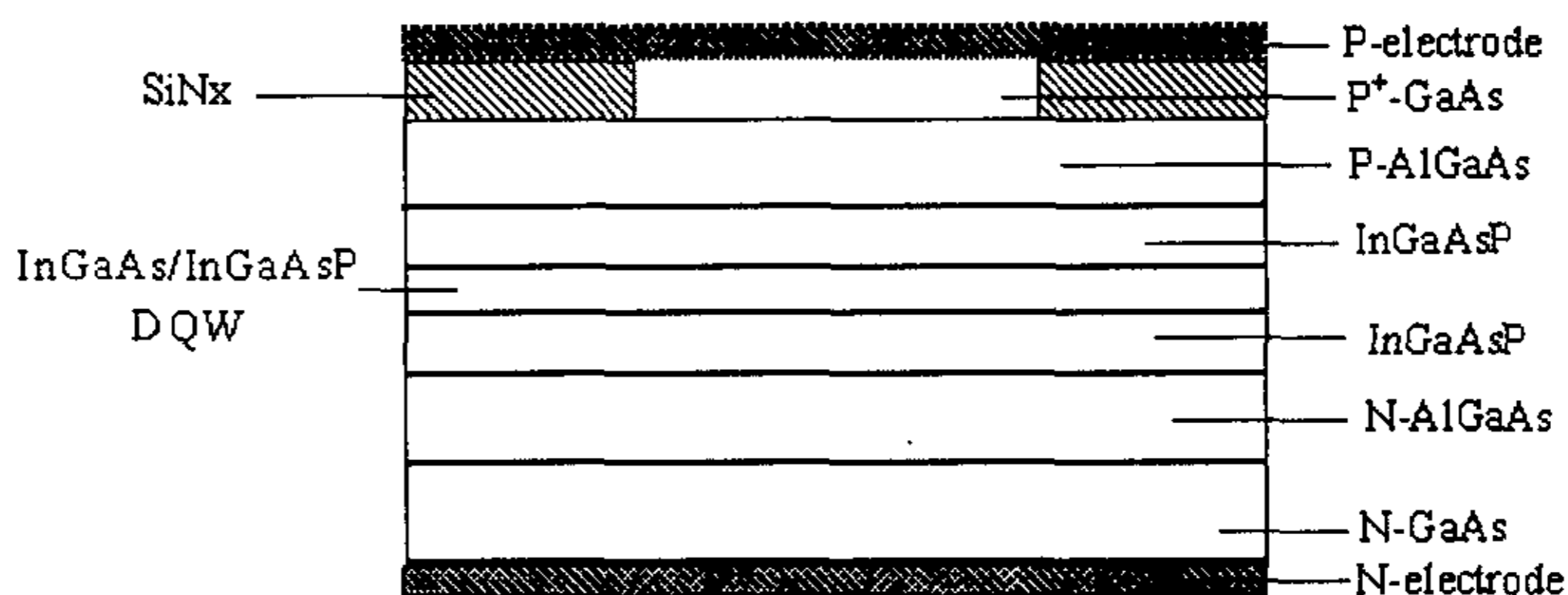


图 4-2 980LD 的结构结构示意图

首先，在 20  $\mu$ A 和 5mA 的注入电流下，分别测试了器件在 2.5Hz 处的电压噪声以及器件的输出光功率  $P_1$ ；然后将器件在室温下恒流老化 800 小时（老化电流为 300mA）。老化后，再重新测试每只器件的噪声和输出光功率  $P_2$ ，定义  $\Delta P = P_2/P_1$ 。表 4-1 给出了测试结果。表 4-1 的  $S_{v1}$  ( $nV/Hz^{1/2}$ ) 和  $S_{v2}$  ( $nV/Hz^{1/2}$ )

分别为器件在  $20\ \mu\text{A}$  和  $5\text{mA}$  注入电流下的噪声。

从表 4-1 中，我们可以得到下面几点结论：

1. 老化后仍可靠的器件 ( $\Delta P$  高于 70%) 都是老化前噪声低的器件，而老化前噪声大的器件 (只要  $S_{v1}$  和  $S_{v2}$  中有一个比较大)，老化后都是不可靠器件，或者已经失效，或者  $\Delta P$  小于 70%。

2. 老化后器件噪声普遍增大，特别是老化后已经失效和  $\Delta P$  小于 70% 的器件，其噪声明显变大。但也有些器件表现特殊，如 B6<sup>#</sup>，B14<sup>#</sup>，A3<sup>#</sup>，A4<sup>#</sup> 等，这些器件老化后或失效或  $\Delta P$  小于 70%，但噪声变化不大，这些器件都是老化前噪声就很大的器件。

3. 还有些器件 (如 B16<sup>#</sup>，B19<sup>#</sup> 等)，老化前噪声较小，但老化后输出光功率下降明显。

#### 4.2.2 结果讨论

由前面的分析可知，器件在小注入下的噪声反映了器件的表面、界面状况的好坏以及有源区内部缺陷的多少<sup>[18-20]</sup>。而器件在较高注入下的噪声大小与非有源区的质量有关，波导层、限制层、包层的不完善以及欧姆接触不好都将使器件在较高注入下的噪声变大<sup>[20]</sup>。所以器件在  $20\ \mu\text{A}$  和  $5\text{mA}$  注入电流下的噪声大小都反映了器件质量的好坏，与器件的可靠性密切相关。因此老化后  $\Delta P$  大于 70% 的器件都是初始噪声小的器件，而初始噪声大的器件老化后都是不可靠的器件。在老化过程中，缺陷增长，使器件退化，同时器件噪声增大。老化后已经失效和  $\Delta P$  小于 70% 的器件，可能是老化过程中缺陷增长较多，导致噪声也明显变大。由前面所述，并联线性回路的存在将使器件噪声大大变小，所以有的器件老化前噪声较小，但老化后输出光功率下降明显，其可能的原因是并联线性回路的存在<sup>[19]</sup>。

#### 4.2.3 其他器件的实验结果

室温 1.1 倍阈值下，对 GaAs/AlGaAs 双异质结激光器<sup>[13, 15]</sup>和 InP/InGaAsP V 沟半导体激光器<sup>[15]</sup>进行恒流电老化，输出光功率降低为初始值的 70% 定义为器件寿命的终止。寿命超过 100 小时的器件大都是老化前噪声小的器件，而初始噪声大的器件在老化过程中都较快地退化了。这进一步证实了噪声与器件可靠性间存在相关性。图 4-3 (a) (b) 分别给出了 23 支 GaAs/AlGaAs 双异质结激光器和 21 支 InP/InGaAsP V 沟半导体激光器噪声初测值与器件寿命间的实验结果。

表 4-1 噪声测试结果 (一)

number	Before aging		After aging		$\Delta P(\%)$
	$S_{v1}$	$S_{v2}$	$S_{v1}$	$S_{v2}$	
B1	2160	65.2	1580	101.4	95.1
B2	4190	46.8	17500	916	92.3
B3	1000	5130	1020	5380	Failing
B4	2530	468	2610	578	91.2
B5	2120	502	1860	480	96.3
B6	4920	1590	4210	1360	68.1
B7	29600	1890	27200	819	65
B8	1540	223	29900	468	Failing
B9	2460	287	228	27200	Failing
B10	1390	89.1	1550	110.3	92.8
B11	1540	50.1	2870	1970	96.7
B12	448	24.5	405	134	45.9
B13	1200	51.1	2150	24900	33
B14	155410	100	146000	100.8	Failing
B15	1000	67	1210	89	97
B16	936	89.5	1040	162	16
B19	579	70.8	546	1840	Failing
B20	1460	101.6	1870	3370	65.6
B21	82600	68.9	2500	130	92.6
B22	1250	77.6	2140	121.5	95.8
B23	2416	1028	4650	1483	68.9
B24	33410	673	34300	702	48.6
B26	1810	62.5	2160	84.3	79.2
B27	2820	64.8	2910	1210	96.7
B28	866	81.2	1100	89.1	91.3
A1	679	120	891	126.8	97.8
A2	1285	78.9	1301	81.6	88.9
A3	13000	1560	13200	2658	51.8
A4	17600	17.6	17700	320	67.9
A5	11600	21.8	10800	412	58.7
A8	14700	173	21800	329	Failing
A9	683	84.5	771	92.6	96.8
A10	856	210	691	230	95
A11	911	81.3	978	60.2	93.4
A12	1520	115.2	1650	108.2	94.1
A13	1000	161.5	2100	226	87.6
A14	31100	599	42300	852	43.8
A15	696	141	34400	329	76.7
A16	8420	599	8410	586	86.6
A17	583	64.2	621	72.3	91.2
A18	550	67	64.7	64.3	93
A19	927	120.4	1240	131.6	94
A20	2180	96.4	2560	116.7	95.7

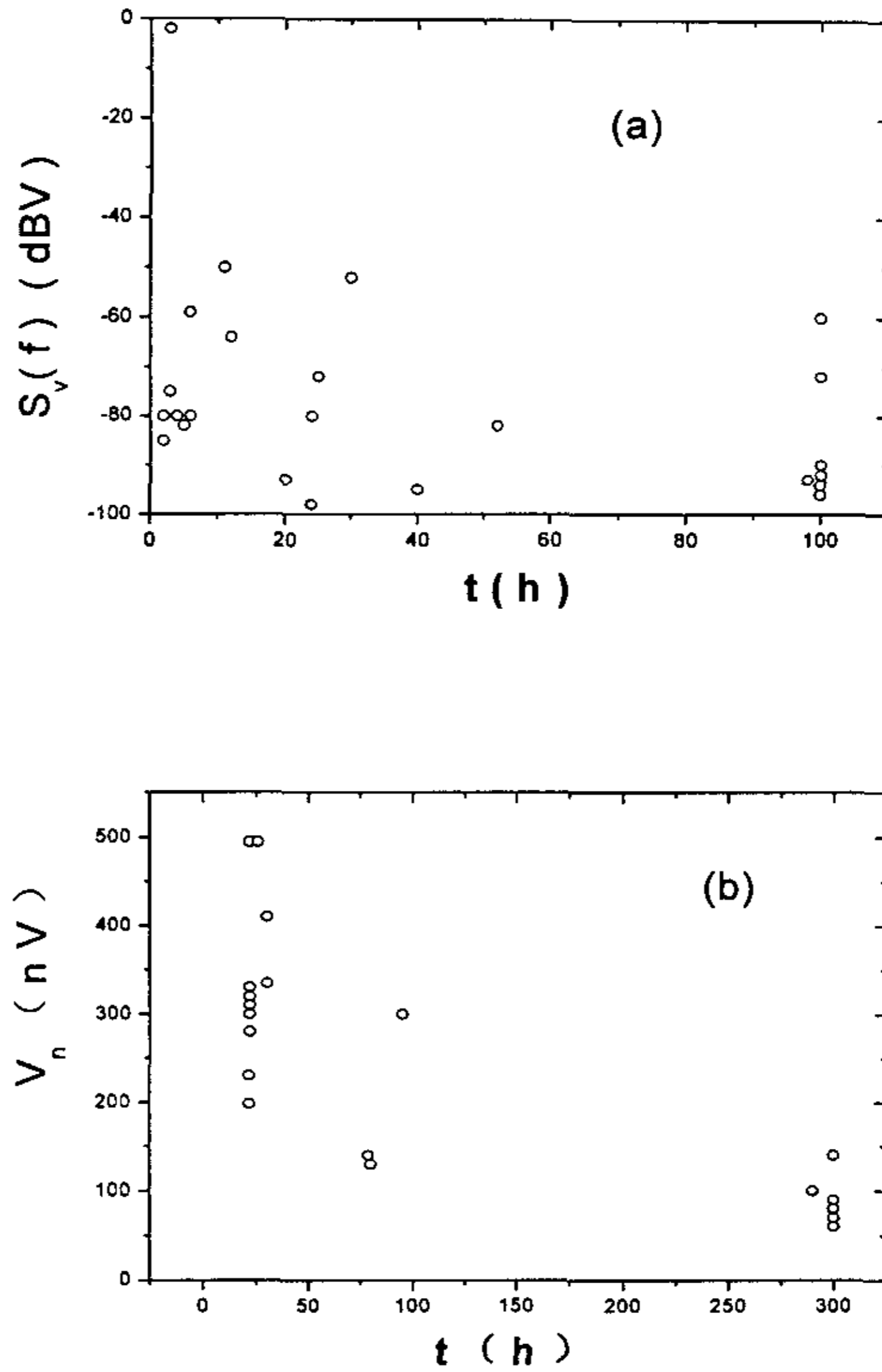


图 4-3 噪声与器件寿命的实验结果

### § 4.3 噪声用于半导体激光器可靠性筛选

#### 4.3.1 引言

从前面的讨论和上节的实验结果可知，噪声大小与器件可靠性密切相关，噪声大的器件通常都是可靠性差的器件。在实际中，更有实用价值的是根据器

件噪声的初测值大小来预报器件的可靠性。在本节，我们给出了噪声用于预报器件的可靠性的一般方法，从测试电流和频率选择以及噪声判决阈值确定等方面入手，提出了提高预报准确性的新措施，并与实际老化结果进行了对照。

#### 4.3.2 测试频率的选择

选择适当频率处的器件噪声作为判据，是可靠性筛选的一个主要问题。Vandamme 用 3Hz 处的电流噪声对太阳能电池的可靠性进行估计<sup>[21]</sup>，用 1Hz 处的电压噪声评价了半导体激光器的可靠性<sup>[11]</sup>，Dieudonne 等人用 10Hz 处的电压噪声预测了 TEGFETs 的性能<sup>[22]</sup>，Jones 等人用恒定电流下 10KHz 处的噪声估计了硅薄膜电阻的稳定性<sup>[23]</sup>。那么究竟选择多大频率处的噪声作为器件可靠性评价的判据最合适呢？

如果器件中只有 1/f 噪声和散弹噪声，选择特定频率处的噪声对器件进行可靠性筛选是足够的<sup>[24]</sup>，这个特定频率点决定于 1/f 噪声和散弹噪声大小的比，一般小于 10KHz。然而，半导体激光器中的噪声通常是 1/f 噪声和 g-r 噪声的叠加。表面及 pn 结周围状况不好，漏电回路的存在和欧姆接触不好是 1/f 噪声的重要来源；而 pn 结处的深能级缺陷则产生 g-r 噪声，而且能级位置不同，g-r 噪声的频率也不同。在半导体激光器中我们就发现不同器件的 g-r 噪声频率有较大差别，如图 3-14 (b)，3-16 所示。所以某一特定频率处的噪声大小不足以反映器件噪声的全部特征。我们在实际中采取下面的方法确定器件可靠性评价的噪声判据：测量器件的低频电压噪声谱密度  $S_v(f)$ ，作出  $fS_v(f) \sim f$  曲线，若曲线有明显的峰起，表明器件存在 g-r 噪声，直接被筛选掉。若曲线没有峰起，则选择 2.5Hz 处的噪声作为器件可靠性评价的噪声判据。这种方法确定的判据充分反映了器件的 1/f 噪声大小和不同频率的 g-r 噪声的大小。

#### 4.3.3 测试电流的选择

器件 pn 结表面、界面及器件内部不完善的存在，是器件噪声的重要来源，主要由器件在小注入下的噪声  $S_{v1}(f)$  来表征<sup>[18-20]</sup>；器件 pn 结以外各层的不完善（如欧姆接触不好，串联电阻较大等）也是器件噪声的重要来源，主要由器件在较高注入下的噪声  $S_{v2}(f)$  来反映<sup>[20]</sup>。所以，将噪声用于器件可靠性筛选时，既应考虑  $S_{v1}(f)$  也应考虑  $S_{v2}(f)$ 。在以前的报导中却只考虑了  $S_{v2}(f)$ <sup>[11,13,15,16]</sup>，这

是不全面的，在一定程度上影响了筛选的准确率。我们在实验中既测量了器件在小注入 ( $I=20\mu\text{A}$ ) 下的噪声  $S_{v1}(f)$ ，也测量了器件在较高注入 ( $I=5\text{mA}$ ) 下的噪声  $S_{v2}(f)$ 。把  $S_{v1}(f)$  和  $S_{v2}(f)$  都做为器件可靠性筛选的判据，提高了筛选的准确率。

#### 4.3.4 实验结果

##### 1. 噪声测试

室温下，测试了 30 只器件在  $20\mu\text{A}$  和  $5\text{mA}$  注入电流下的低频电压噪声谱密度。表 4-2 给出了测试结果。其中有 3 只器件有 g-r 噪声，都是在  $I=20\mu\text{A}$  时出现的。直接被筛选掉。

表 4-2 噪声测试数据 (二)

Device number	Noise ( $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )				老化后	Device number	Noise ( $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ )				老化后
	$I=20\mu\text{A}$		$I=5\text{mA}$				$I=20\mu\text{A}$		$I=5\text{mA}$		
6	12.55m	1.1	197.15 $\mu$	2.29	失效	2498	80.7m	1.91	1.7m	3.23	
3	g-r		3.29m	3.52	失效	2509	399.6m	2.6	233 $\mu$	2.37	失效
B14	15.32m	1.18	276 $\mu$	2.44		2496	0.556m	-0.25	94.6 $\mu$	1.98	
13	14.58m	1.16	141 $\mu$	2.15		B38	13.58m	1.13	142.59 $\mu$	2.15	
B161	1m	0	86.27 $\mu$	1.94		4	15.32m	1.19	272 $\mu$	2.43	
2497	167.63m	2.22	52.7 $\mu$	1.72		2512	12.88m	1.11	169.8 $\mu$	2.23	
B292	0.881m	-0.06	118 $\mu$	2.07		2511	39.8m	1.6	102.3 $\mu$	2.01	
2495	0.337m	-0.42	127.8 $\mu$	2.11		2499	g-r		213.2 $\mu$	2.61	失效
B31	0.8m	-0.1	108 $\mu$	2.03		2504	199.5m	2.3	676.1 $\mu$	2.83	失效
B291	112m	2.05	10.1m	4		B271	g-r		1623.6 $\mu$	2.02	失效
B33	18.28m	1.26	196 $\mu$	2.29		2497	125.9m	2.1	1412.5 $\mu$	3.15	
B41	1.7m	0.23	81.39 $\mu$	1.91		2514	3.98m	0.6	41.69 $\mu$	1.62	
B39	10.7m	1.03	147.9 $\mu$	2.17		2507	6.45m	0.81	28.84 $\mu$	1.46	
2505	24.5m	1.39	13.2m	4.12	失效	B411	3.67m	0.56	20.89 $\mu$	1.32	
2508	9.9m	1.1	152.23 $\mu$	2.18		B221	1012m	3.01	1995.2 $\mu$	3.3	失效

##### 2. 噪声分布的直方图

对每只器件的噪声取对数，相应结果如表 4-2 所示。噪声 (对数值) 分布的直方图如图 4-4 所示。可以看出器件噪声的分布基本呈正态分布。经拟合得到噪声 (对数值) 分布的均值 ( $M$ ) 和方差 ( $S$ )。当  $I=20\mu\text{A}$  时， $M_1=1.0737$ ， $S_1=0.8378$ 。当  $I=5\text{mA}$  时， $M_2=2.388$ ， $S_2=0.6762$ 。

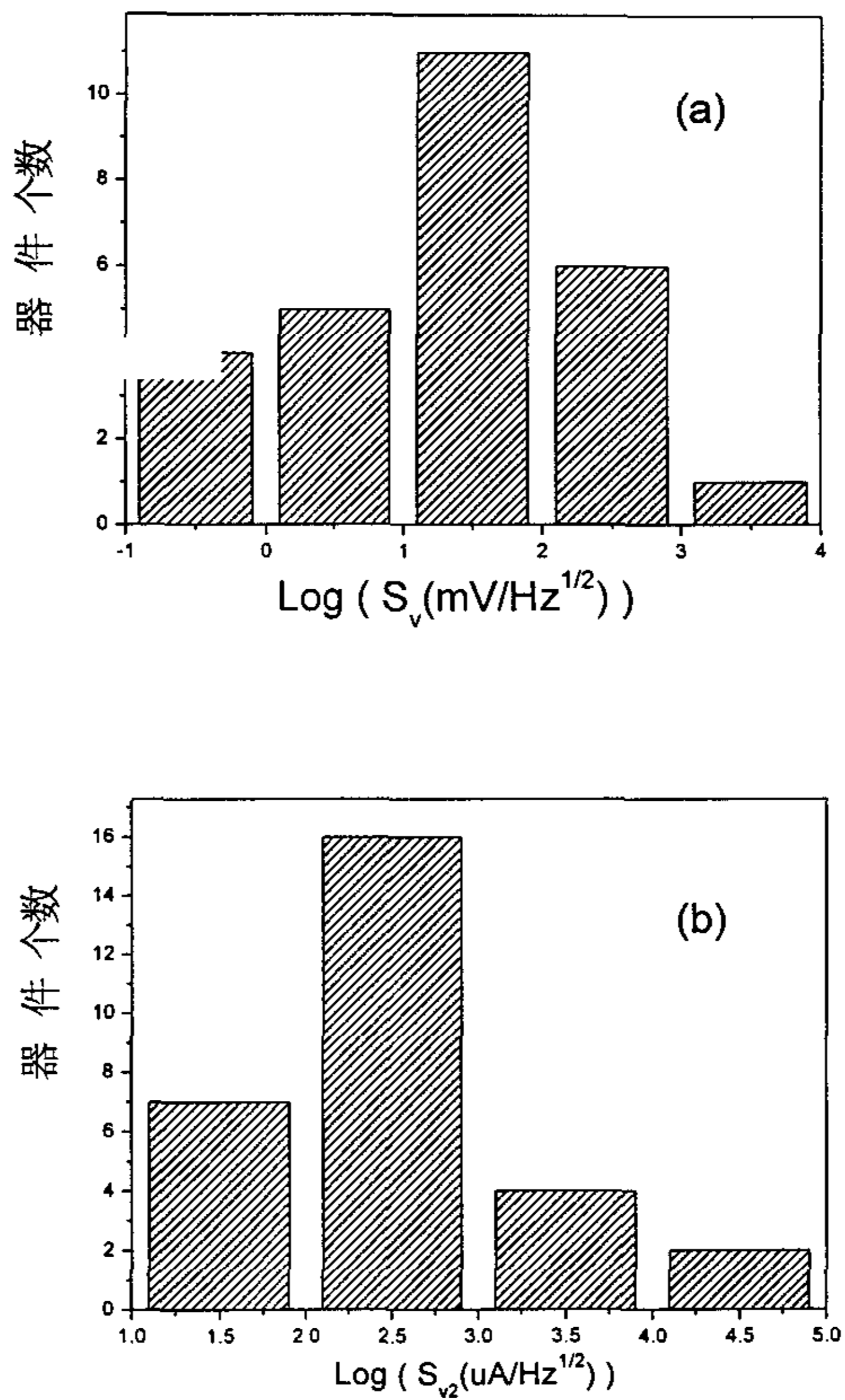


图 4-4 噪声分布的直方图 (一)

(a)  $I=20\mu\text{A}$ , (b)  $I=5\text{mA}$

### 3. 判据阈值的确定

选择某个噪声值  $X$ , 使噪声大于  $X$  的器件占器件总数的 10%。由上面得

到的均值和方差，根据概率论理论可求得  $X$ ，并设  $X$  为噪声判据的阈值。由此得，当  $I=20\mu\text{A}$  时， $X_1=2.146$ ，对应的噪声值为  $139.98\text{mV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。当  $I=5\text{mA}$  时， $X_2=3.254$ ，对应的噪声值为  $1792.8\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

把  $139.98\text{mV}/\text{Hz}^{1/2}$  和  $1792.8\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$  分别作为  $I=20\mu\text{A}$  和  $I=5\text{mA}$  时的噪声判据阈值。当  $I=20\mu\text{A}$  时， $S_{v1}>139.98\text{mV}/\text{Hz}^{1/2}$  的器件为 4 只。当  $I=5\text{mA}$  时， $S_{v2}>1792.8\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$  的器件共 4 只。则  $S_{v1}>139.98\text{mV}/\text{Hz}^{1/2}$  或  $S_{v2}>1792.8\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$  的器件总数为 7 只，加上有  $g-r$  噪声的 3 只器件，共 10 只。也就是说，根据我们的假定，这 10 只器件应是不可靠器件。

#### 4. 老化结果

$70^\circ\text{C}$  和  $400\text{mA}$  的条件下，对器件老化 200 小时。器件阈值增大到初始值的 120%，定义器件失效。老化结果如表 4-2 所示。从老化结果看，共有 8 只器件失效。噪声大于阈值而失效的器件有 7 只（包括有  $g-r$  噪声的三只器件），大于阈值而没有失效的器件有 3 只，小于阈值而失效的器件有 1 只。

#### 5. 筛选准确性的讨论

定义：

$$\lambda_1 = \frac{\text{噪声大于阈值且已失效的器件数}}{\text{噪声大于阈值的器件总数}}$$

$$\lambda_2 = \frac{\text{噪声小于阈值且已失效的器件数}}{\text{噪声小于阈值的器件总数}}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

$\lambda$  越大，筛选的准确性越高<sup>[24]</sup>。从上面的老化结果看，既考虑  $S_{v1}$  又考虑  $S_{v2}$  时， $\lambda=15.4$ ；而只考虑  $S_{v2}$  时， $\lambda=2.2$ 。可见考虑  $S_{v1}$  后，筛选的准确性大大提高。

我们对表 4-1 中的数据也进行了同样的分析， $I=20\mu\text{A}$  和  $I=5\text{mA}$  时，器件噪声（对数值）分布的直方图如图 4-5 所示，基本符合对数正态分布。 $I=20\mu\text{A}$  时，噪声分布的均值和方差为： $M_{11}=3.414$ ， $S_{11}=0.626$ 。 $I=5\text{mA}$  时，噪声分布的均值和方差为： $M_{22}=2.165$ ， $S_{22}=0.542$ 。用上面相同方法，得到噪声的判据阈值分别为： $S_{v1}=16433.46\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ ， $S_{v2}=721\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 。同时考虑  $S_{v1}$  和考虑  $S_{v2}$  时， $\lambda=2.4$ ；而只考虑  $S_{v2}$  时， $\lambda=0.46$ 。同样证实了考虑  $S_{v1}$  对提高筛选

准确率的重要性。

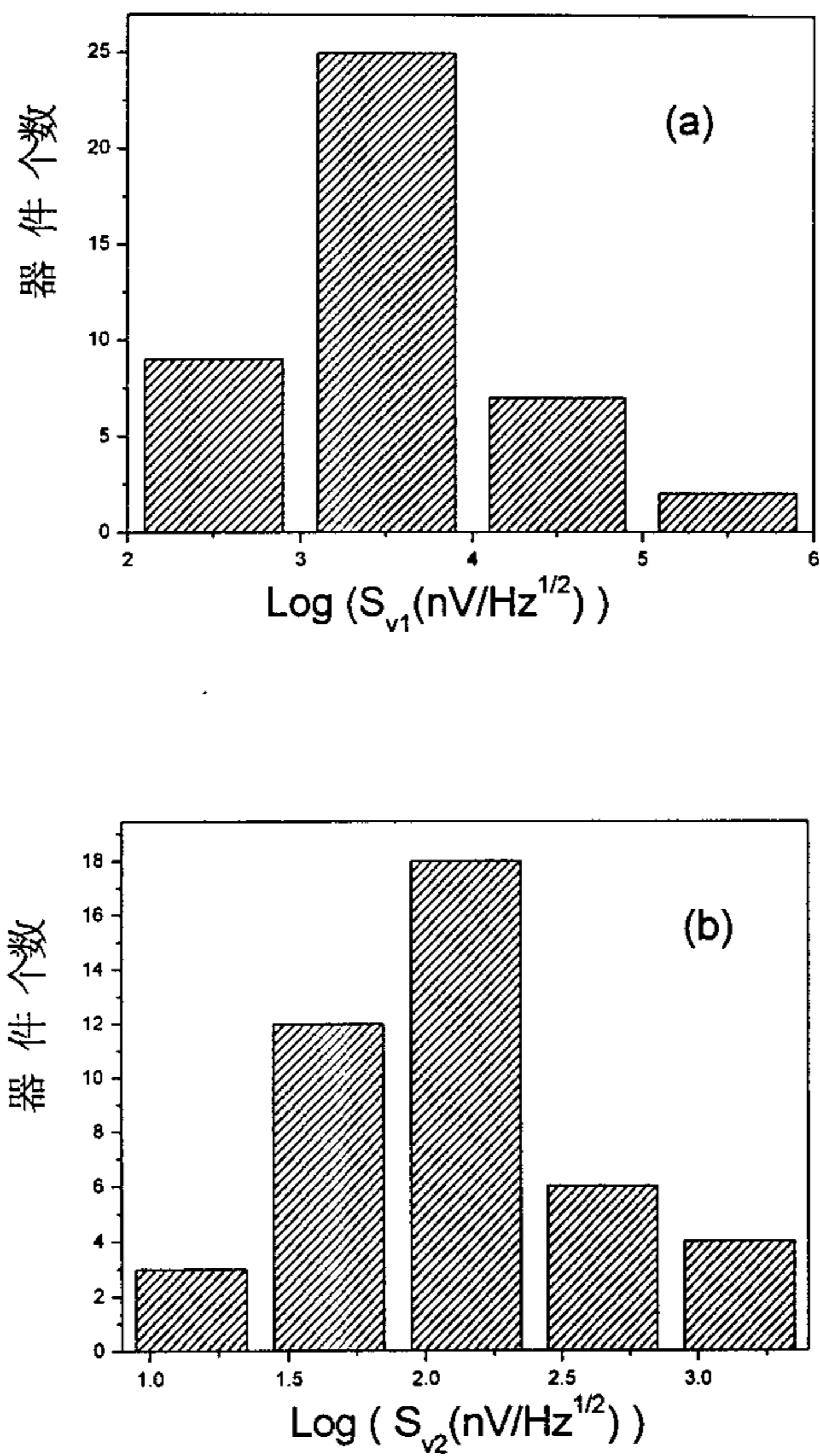


图 4-5 噪声分布的直方图 (二)

(a)  $I=20\mu\text{A}$ , (b)  $I=5\text{mA}$

在实际中，需根据抽样器件的老化结果多次选择概率（如 20%，5% 等）以确定新的噪声判据阈值，再计算筛选准确率  $\lambda$ ，选取  $\lambda$  最大时对应的噪声值作为同批器件可靠性筛选的判据阈值。把噪声测试技术和加速电老化方法结合起来，可提供一种快速，无损且准确率较高的器件可靠性筛选的新方法。

#### § 4.4 进一步提高噪声用于器件可靠性筛选准确率的方法

在各种应力作用下，器件正常状态向失效状态变化过程中，缺陷状态必然随时间增加，这可以表示为：

$$\frac{dM}{dt} = A_0 e^{-E_a/kT} \quad (4.4)$$

$\frac{dM}{dt}$  表示缺陷状态增加的速度， $E_a$  为失效机构激活能， $T$  为绝对温度， $k$  为玻尔兹曼常数，上式为 Arrhenius 公式，令  $M_1$  为老化前的缺陷状态， $M_2$  为常规筛选后(经历的时间为  $t$ )的缺陷状态，显然有：

$$M_2 = M_1 + tA_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.5)$$

在应力作用下，缺陷发展到一定程度  $M_L$  则器件将会出现失效，故器件寿命  $t_L$  为：

$$t_L = \frac{M_L - M_1}{A_0} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.6)$$

再由 (4.5) 式，令  $\Delta M = M_2 - M_1$ ，则 (4.6) 式为：

$$t_L = \frac{M_L - M_1}{\Delta M} t \quad (4.7)$$

由于半导体激光器的过剩噪声是器件内部和表面缺陷的反映，因此可认为，器件老化前初始噪声为  $S_n$ ，相应的缺陷密度为  $M_1$ ，经过初期筛选后噪声变化量为  $\Delta S_n$ ，缺陷密度增加为  $\Delta M$ ，即  $S_n \sim M_1$ ， $\Delta S_n \sim \Delta M$ 。因此说明器件的使用可靠性，即器件的工作寿命不仅取决于噪声的初测值 ( $S_n$ )，而且与噪声随应力的变化量 ( $\Delta S_n/S_n$ ) 有关。所以我们可以得到下面两条结论：

① 初始噪声大的器件，其寿命较短。

② 初始噪声虽然小，但经过初期筛选后噪声变化大的器件也是不可靠器件。

这样，我们将噪声用于器件可靠性筛选时，既要考虑器件初测噪声的大小，也应考虑噪声随环境及工作条件的变化量。有的器件的初始噪声较小，但随应力的变化量较大，这样的器件通常也是不可靠器件，如表 4-1 中的 B13<sup>\*</sup>，B19<sup>\*</sup> 等。所以把噪声随应力的变化量也引入可靠性筛选，将进一步提高筛选的准确率。

## § 4.5 小结

研究半导体激光器的可靠性及其规律性是一项重要工作，这对改进器件性能和正确使用器件具有重要意义。传统的方法是加速电老化的方法，把老化期间在恒定工作电流下输出光功率变化大的器件或在恒定输出光功率下驱动电流变化大的器件筛选掉。这种方法速度慢，并容易对器件造成损伤。本章提出了噪声用于器件可靠性筛选的新方法：通过噪声测试和部分抽样器件的老化实验来确定噪声判决阈值。然后用该阈值对同批其他大量器件的可靠性进行筛选。从测试电流和频率选择以及判据阈值确定等方面入手，提出了提高筛选准确率的方法。首次将小电流下的噪声引入了半导体激光器件的可靠性筛选，提高了筛选的准确率。

噪声用于器件可靠性筛选的一般步骤：

1. 测试器件的噪声并做出作出  $fS_v(f) \sim f$  曲线，若曲线有明显的峰起，表明器件存在 g-r 噪声，直接被筛选掉。若无峰起，则选择 2.5Hz 处的噪声作为判据。
2. 分析噪声的分布情况，选择噪声分布某一概率（如 10%）的噪声值 X1（即噪声大于 X1 的器件占总器件的 10%），作为噪声判据阈值。
3. 对部分抽样器件进行老化，并确定器件失效条件。
4. 将老化结果与根据阈值 X1 得到的预测结果相对比，计算筛选准确率  $\lambda_1$ 。
5. 再选择其他概率值（如 20%、5% 等），重新确定判据 X2, X3 等，然后重复步骤 4，得  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  等，这样重复多次之后，最后选择  $\lambda$  最大时对应的阈值作为最后的判决阈值，对同批器件进行可靠性筛选。

参考文献：

- [1] Chu S N G, Nakahara S, Twingg M E et al. Defect mechanisms in degradation of 1.3 $\mu$ m wavelength channeled-substrate buried heterostructure laser. J. Appl. Phys., 1988; 63(3), 611-622
- [2] Endo K, Matsumoto S, Kawano H et al. Rapid degradation of InGaAsP/InP double heterostructure laser due to <110> dark line defect formation. Appl. Phys. Lett., 1982; 40, 921-923
- [3] Mizuishi K., Sasaaki S. et al. Reliability of InGaAsP/InP Buried Heterostructure 1.3 $\mu$ m Lasers IEEE J. Q. E, 1983, QE-19(8), 1294-1301
- [4] F.R. Nash, W.B. Joyce, R.L. Hartman, et al. Selection of a laser reliability assurance strategy for long-life application, AT&T Technol. J., 1985, 64(3), 671-715.
- [5] N. R. Mann, R. E. Schafer, and N. D. Singpurwalla, Methods for statistical analysis of reliability and life data, in Applied Statistics. New York: Wiley, ch. 5 and 9
- [6] H. Yonezu, S. Katayama, N. Fujine, I. Sakuma, and K. Nishida, Reliability of light emitters and detectors for optical fiber communication systems, IEEE J. Select. Areas Commun., 1983, SAC-1, 508-514.
- [7] Shi Jiawei, Jin Enshun and Li Hongyan et al., Effective Method of Evaluation of Semiconductor Lasers Quality, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, 17(8), 596-600
- [8] Shi Jiawei, Jin Enshun, Li Hongyan et al., The characteristic junction parameter of a semiconductor laser and its relation with reliability, Optical and Quantum Electronics, 1996, 28, 647-651
- [9] Shi Jiawei, Jin Enshun and Gao Dingsan, The junction voltage saturation and reliability of semiconductor laser, Optical and Quantum Electronics, 1992, 24, 775-781
- [10] Shi Jiawei, Jin Enshun, Ma Jing et al.,  $\eta$  and its Temperature Dependence are the Important Criteria of the Reliability of Semiconductor Lasers, Microelectron Reliab., 1994, 34(7),

1405-1408

- [11] L. K. J. Vandamme and L. J. Van Ruyven, 1/f noise used as a reliability test for diode lasers, In noise in physical system and 1/f noise, Proc. Int. conf. 1983, 245-247
- [12] Gisela Hartler, Ute Golze, Katrain paschke. Extended noise analysis-a novel tool for reliability screening. Microelectronics Reliab, 38(1998), 1159-1198
- [13] 石家纬、金恩顺、马靖等, 半导体激光器的低频电噪声谱密度和器件的可靠性. 中国激光 1993, A20(10), 729-732.
- [14] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al, Low-frequency electrical noise as reliability estimation for high-power semiconductor lasers. Optical and Quantum electronics, is accepted.
- [15] Shi JiaWei, Jin EnSun, Ma Jing et al. An Improved Approach and Experimental Results of A low-frequency Noise Measurement Technique used for Reliability Estimation of Diode Lasers. Microelectron Reliab., 1994, 34(7), 1261-1264.
- [16] Yisong Dai. A study of optical Noise Measurement as Reliability Estimation for Laser Diodes. Microelectron Reliab., 1995, 35(4), 731-734.
- [17] Hu Guijun, Shi jiawei, zhang Sumei et al. Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and device quality. Proceeding of SPIE. Vol.4220, 2000, 217-220.
- [18] 胡贵军, 石家纬, 张素梅等, 半导体激光器电噪声与非辐射复合电流的相关性. 半导体光电, 2001, 22(1), 12-14
- [19] Hu Guijun, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al, Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and devices surface non-radiative current. Microelectronics Reliab. 已接收。
- [20] X. Y. Chen, A. Pedersen, A. D. van Rheenen. Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes. 2001, Microelectronics Reliab. 41, 105-110.

- [21]L. K. J. Vandamme, R. Alabedra and M. Zommiti. 1/f noise of a reliability estimation for solar cells. Solid-state Electron. 1983, 26(7), 671-674.
- [22]J. M. Dieudonne, M. Pouysegur, J. Graffeuil et al. Correlation between low-frequency noise and low-temperature performance of a two dimensional electron GaAs FETs, IEEE Trans. Electron Devices, 1986, ED-33(5), 572-574
- [23]b. k. Jones and E. S. C. Mzunzv, The stability of polycrystalline silicon thin file resistors measured using excess noise, Microelectron. Reliab. 1989, 29(4), 543-544.
- [24]Yisong Dai, Optimal low-frequency noise criteria used as a reliability test for BJTs and experimental results, Microelectron. Reliab. 1991, 40(1), 75-81.

## 第五章 小波分析在噪声信号处理和器件可靠性评价中的应用

### § 5.1 小波分析概述

小波分析是 Morlet 于 20 世纪 80 年代初在分析地球物理信号时提出的<sup>[1]</sup>, 是一种强有力的信号分析工具。它是泛函分析, 傅立叶分析, 样条理论, 数值分析等多个学科相互交叉的结晶。

小波分析属于时频分析的一种。传统的信号分析是建立在傅立叶 (Fourier) 变换的基础之上的, 由于傅立叶分析使用的是一种全局的变换, 要么完全在时域, 要么完全在频域, 因此无法表述信号的时域局部化性质, 而这种性质恰恰是非平衡信号最根本和最关键的性质。为了分析和处理非平衡信号, 人们对傅立叶分析进行了推广乃至根本性的革命, 提出并发展了一系列新的信号分析理论: 短时傅立叶变换、Gabor 变换、时域分析、小波变换、Randon-Wigner 变换、分数傅立叶变换、线性调频小波变换、循环统计量理论和调幅-调频信号分析等。其中, 短时傅立叶变换和小波变换也是应传统的傅立叶变换不能够满足信号处理的要求而产生的。短时傅立叶变换的基本思想是: 假定非平衡信号在分析窗函数  $g(t)$  的一个短时间间隔里是平衡 (伪平衡) 的, 并移动分析窗函数, 使  $f(t)g(t-\tau)$  在不同的有限时间宽度内是平衡信号, 从而计算出各个不同时间的功率谱。但从本质上讲, 短时傅立叶变换是一种单一分辨率的信号分析方法, 因为它使用一个固定的短时窗函数。因而短时傅立叶变换在信号分析上还是存在着不可逾越的缺陷。

小波变换是一种信号的时间-尺度 (时间-频率) 分析方法, 它具有多分辨率分析 (Multiresolution Analysis) 的特点, 而且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 是一种时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 很适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分, 所以被誉为分析信号的显微镜, 利用连续小波变换进行动态系统故障探测与诊断具有良好的效果。

小波分析是调和分析这一数学领域半个世纪以来的工作结晶, 已经和必然将广泛应用于信号处理、图象处理、量子场论、地震勘测、语音识别与合成、音乐、雷达、CT 成像、彩色复印、流体湍流、天体识别、机械识别、机械故障诊断与监控、分形及数字电视等科技领域<sup>[2-7]</sup>。原则上讲, 传统上使用傅立

叶变换的地方，都可以用小波变换取代。小波分析优于傅立叶变换的地方是，它在时域和频域同时具有良好的局部化性质。

## § 5.2 小波分析的基本理论

### 5.2.1 连续小波变换

假设  $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ，其傅立叶变换为  $\hat{\Psi}(\omega)$ ，当  $\hat{\Psi}(\omega)$  满足允许条件（完全重构条件或恒等分辨条件）时，即

$$C_{\Psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (5.1)$$

称  $\Psi(t)$  为一个基本小波或母小波 (Mother Wavelet)，将小波母函数  $\Psi(t)$  进行伸缩和平移，设其伸缩因子（也称尺度因子）为  $a$ ，平移因子为  $b$ ，则伸缩平移后的函数为

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R} \quad a \neq 0 \quad (5.2)$$

称  $\Psi_{a,b}(t)$  为依赖参数  $a, b$  的小波基函数。由于尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  是取连续变化的值，因此称  $\Psi_{a,b}(t)$  为连续小波基函数。它们是由同一母函数  $\Psi(t)$  经伸缩和平移后得到的一组函数系列。

对于任意的函数  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  的连续小波变换为

$$WT_f = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) * \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (5.3)$$

称  $WT_f(a, b)$  为小波变换系数。其重构公式（逆变换）为

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{\mathbb{R}} \frac{da}{a^2} \int_{\mathbb{R}} WT_f(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) db \quad (5.4)$$

### 5.2.2 离散小波变换

连续小波基函数  $\Psi_{a,b}(t)$  具有很大的相关性, 因此信号  $f(t)$  的连续小波变换系数  $WT_f(a,b)$  的信息量是冗余的。虽然在有些情况下, 其冗余性是有益的 (如去噪, 数据恢复和特征提取等), 但在很多情况下, 从压缩数据及节约计算量的角度考虑, 在不丢失原信号信息的情况下, 应尽量减小小波系数的冗余度。在理想情况下, 离散后的小波基函数满足正交完备性条件, 此时计算的小波系数无任何冗余度, 可最大限度地压缩数据并减小计算量。

所谓离散小波变换就是将小波基函数的尺度因子  $a$ , 平移因子  $b$  限定在一些离散点上取值。一种通常的离散方法是按幂级数进行离散, 即取  $a = a_0^j, b = kb_0 a_0^j$  ( $j, k$  为整数,  $a_0 \neq 1$ )。离散后的小波基函数为

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (5.5)$$

则任意函数  $f(t)$  的离散小波变换为

$$WT_f(j,k) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle \quad (5.6)$$

若要由离散小波变换系数稳定地重建  $f(t)$ , 则  $\langle f, \Psi_{j,k} \rangle$  必须满足小波框架条件, 即

$$A \|f\|^2 \leq \sum_{j,k} |\langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle|^2 \leq B \|f\|^2 \quad (5.7)$$

$\|f\|$  为函数  $f(t)$  的范数,  $A, B$  为正实数, 称为框架的上下界。当  $A=B$  时, 称为紧框架。

信号  $f(t)$  的重构公式即逆离散小波变换为

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_{j,k} WT_f(j,k) * \Psi_{j,k}(t) \quad (A=B, \text{ 即紧框架时}) \quad (5.8)$$

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{j,k} WT_f(j,k) * \Psi_{j,k}(t) \quad (A \neq B \text{ 时}) \quad (5.9)$$

为保证信号重构有高的精确度， $a_0$ 和 $b_0$ 的选择，应该使网格点尽量可能密（即 $a_0$ 和 $b_0$ 尽可能小），因为如果网格点越稀疏，使用的小波函数 $\Psi_{j,k}(t)$ 和离散小波系数 $WT_f(j,k)$ 就越少，信号重构的精确度也就越低。

### 5.2.3 二进制小波变换

对连续小波只在尺度上进行二进制离散，而位移仍取连续变化，称这类小波为二进小波，表示为

$$\Psi_{j,b}(t) = 2^{-j/2} \Psi\left(\frac{t-b}{2^j}\right) \quad j \in Z \quad (5.10)$$

任意函数 $f(t)$ 的二进小波变换系数为

$$WT_f(j,b) = 2^{-j/2} \int f(t) \Psi\left(\frac{b-t}{2^j}\right) dt \quad (5.11)$$

如果存在两个常数 $A, B$ ，且 $0 < A \leq B < \infty$ ，使得

$$A \leq \sum_{j \in Z} \left| \hat{\Psi}(2^{-j} \omega) \right|^2 \leq B \quad (5.12)$$

称(5.12)式为小波的稳定条件， $A=B$ 时，称为最稳定条件。只有满足稳定条件的二进小波才有实用意义，也即其逆变换存在。

二进小波的逆变换公式为

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_{k \in Z} \int_{\mathbb{R}} WT_f(j,b) \quad (A=B) \quad (5.13)$$

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{k \in Z} \int_{\mathbb{R}} WT_f(j,b) \quad (A \neq B) \quad (5.14)$$

二进小波不同于连续小波的离散小波，它只是对尺度参数进行了离散化，而对时间域上的平移参量保持连续变化，因此二进小波仍具有连续小波变换的时移共变性，这是它较之离散小波变换所具有的独特优点。也正因为如此，它在奇异性检测、图象处理方面十分有用。

## § 5.3 小波变换用于器件中 1/f 噪声的提取

### 5.3.1 引言

半导体激光器中的噪声信号主要有白噪声和 1/f 噪声 (有的器件也有 g-r 噪声), 其中白噪声是由材料或器件的本征特性决定的, 1/f 噪声是由材料或器件的不完整性决定的, 1/f 噪声的大小在很大程度上反映了器件的质量和可靠性。噪声用于器件质量表征和可靠性评价时, 我们所关心就是 1/f 噪声的大小。若器件的 1/f 噪声较小, 与器件白噪声大小相差不多时, 很难从测量的噪声信号中得到 1/f 噪声的真实信息。利用小波变换, 可以很容易地从白噪声背景下提取 1/f 噪声。

### 5.3.2 理论分析<sup>[5]</sup>

设  $x(t)$  代表 1/f 噪声,  $w(t)$  代表白噪声, 则测量信号为

$$r(t) = x(t) + w(t) \quad (5.15)$$

经小波变换后的小波系数为

$$r_k^{(m)} = d_k^{(m)} + w_k^{(m)} \quad (5.16)$$

$m$  是尺度序号,  $k$  是时间序号。然后按方差比例提取其中属于 1/f 噪声的小波系数, 即

$$v_k^{(m)} = \left[ \frac{\sigma^2 2^{-mr}}{\sigma^2 2^{-mr} + \sigma_w^2} \right] r_k^{(m)} \quad (5.17)$$

$\sigma^2$  和  $\sigma_w^2$  分别是 1/f 噪声和白噪声的方差,  $r$  是 1/f 噪声的特征参数。 $\sigma^2$ ,  $\sigma_w^2$

和  $r$  可以由  $r_k^{(m)}$  的似然函数进行估计得到。再对式 (5.17) 做小波反变换得

$$\tilde{x}(t) = \sum_m \sum_k v_k^{(m)} \psi_{mk}(t) \quad (5.18)$$

$\tilde{x}(t)$  就是从白噪声中提取的 1/f 噪声。这实际上相当于在尺度域滤波, 在不同尺度  $m$  下按不同比例提取 1/f 噪声。当  $m$  小时, 频率低, 1/f 过程占优势, 所以提取的比例大; 当  $m$  大时, 频率高, 白噪声占优势, 所以提取比例小。

### 5.3.3 实验结果

图 5-1 是对一个实际器件所测噪声的小波变换结果。(a) 是所测噪声信号的时域波形, (b) 是其频谱图。从图 5-1 (b) 中, 我们看到, 信号的频谱几乎与频率无关, 说明信号中白噪声占很大比例。根据 5.3.2 部分的理论分析, 对 5-1 (a) 所示的噪声信号进行小波变换处理, 滤除信号中的白噪声, 图 5-1 (c) 给出了消噪处理后的小波重构信号, 对应的频谱如图 5-1 (d) 所示。从图 5-1 (d) 中清楚地看到, 在低频段, 噪声随频率的增大而减小, 即表现出了明显的  $1/f$  特征, 说明信号中白噪声已大部分被滤除了。

噪声信号中的  $1/f$  成分反映了材料或器件的不完整性, 与器件质量和可靠性密切相关。而在通常测量的器件噪声中,  $1/f$  成分都混杂在白噪声的背景下, 所以准确提取噪声信号的  $1/f$  成分, 对于评价器件质量和可靠性至关重要。小波变换可以方便地从白噪声的背景下有效地提取  $1/f$  噪声, 这在一定程度上将提高噪声用于器件可靠性评价的准确性。

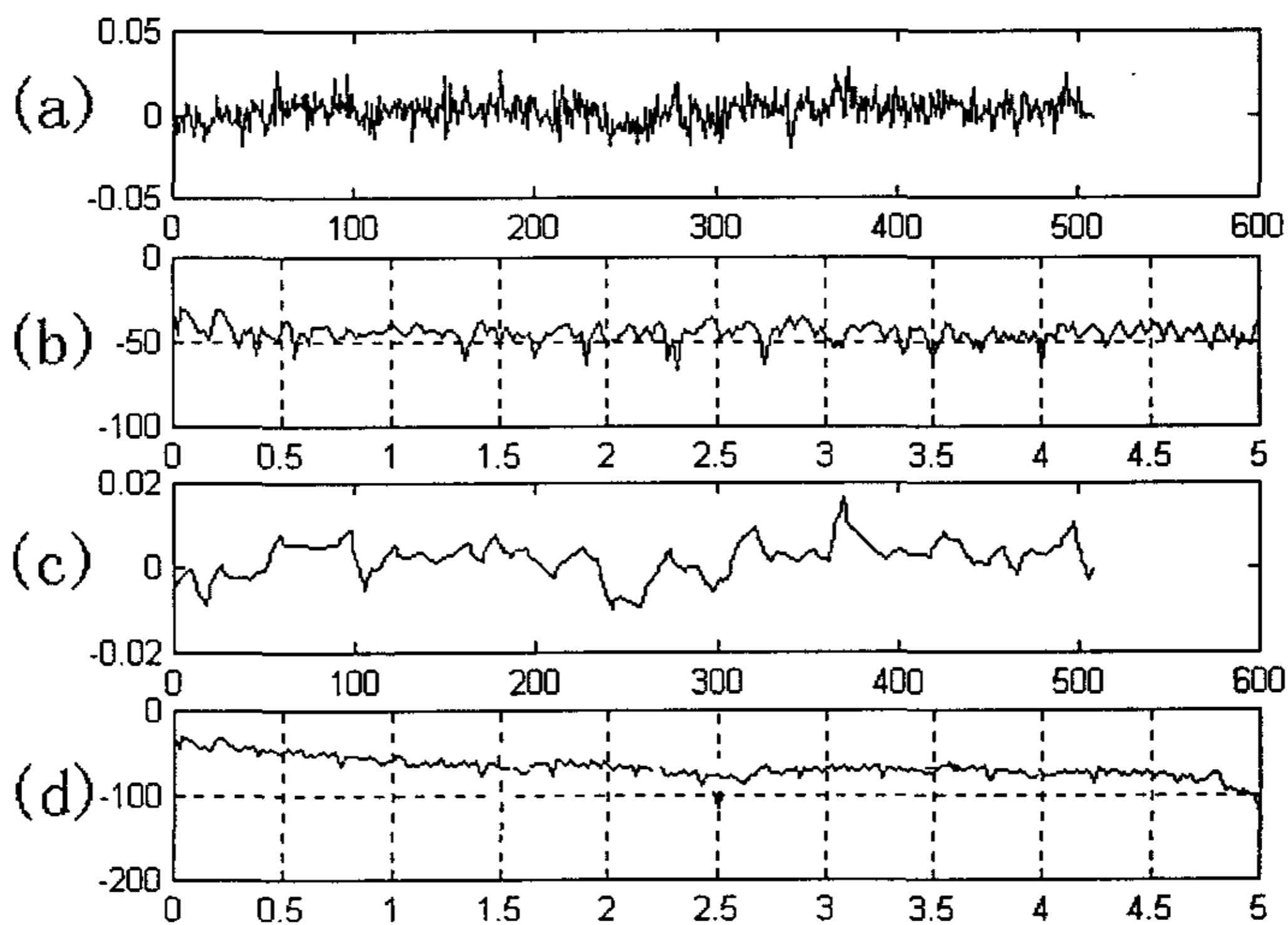


图 5-1 用小波变换提取噪声信号中  $1/f$  分

## § 5.4 用小波变换检测器件噪声信号的奇异性

### 5.4.1 奇变信号的小波检测

前面我们对噪声信号的处理都是基于 Fourier 变换的,把信号从时域向频域转换,从分析信号的时域特性转移到着重考察信号的频域特征。但这种方法本身存在着不足。信号在向频域转换的过程中,本身的时域信息丢失了,尤其丢失了大量的非平稳、短时特征等重要信息。为了提取这些特征量,要求处理方法具有很强的局部时频特性,这是 Fourier 变换无能为力的。

而小波变换具有很好的局部时频特性,时窗宽度和频窗宽度可以根据处理精度的要求进行动态调整。为了将信号的不连续性区分开来,要求某些分解基函数持续的时间非常短,而另外一些分解基函数持续的时间则相对较长,以获得在不同频率处的适当分解率。小波变换就具有这样的特性,非常适合分析和提取非平稳、奇变、短时信号的特征参量<sup>[8]</sup>。假定任一小波基  $\Psi$  和其 Fourier 变换分别是以  $t'$  和  $\omega'$  为中心,  $\Delta\phi$  和  $\Delta\phi'$  为半径的窗函数。对于连续信号  $f(t)$  的小波变换而言:

$$W_f(a,b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5.19)$$

$f(t)$  被限制在时窗  $[b+at' - a\Delta\phi, b+at' + a\Delta\phi]$  的范围内,时窗宽度为  $2a\Delta\phi$ ,反映出信号在时域上的局部化信息。由 Parseval 恒等式

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{2\pi} \langle f', g' \rangle, \quad g \in L^2(\mathbb{R}) \quad (5.20)$$

其中  $f', g'$  分别是  $f, g$  的 Fourier 变换。对上面的积分小波变换运用 Parseval 恒等式,可以推出  $f(t)$  在经过小波变换后,频域被限制在  $\left[\frac{\omega'}{a} - \frac{\Delta\phi'}{a}, \frac{\omega'}{a} + \frac{\Delta\phi'}{a}\right]$  之间,频窗宽度为  $2\frac{\Delta\phi'}{a}$ ,时窗宽度和频窗宽度的积为  $4\Delta\phi \cdot \Delta\phi'$ ,反映出信号在频域上的局部化信息。时域分辨率和频域分辨率可以

动态调整，达到检测信号的目的，当分析低频信号时，对应大尺度，其时间窗口很大；当分析高频信号时，对应小尺度，其时间窗口减小，这恰恰符合实际问题中高频信号持续时间短、低频信号持续时间较长的自然特点。

正是由于小波具有很好时频特性、可调的时频分辨率，在检测突变信号中得到了广泛应用。

设函数  $\theta(x)$  满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} \theta(x) dx = 1 \quad (5.21)$$

式中  $\theta(x) = O(1/(1+x^2))$ ， $O(x)$  代表  $x$  的级数，那么  $\theta(x)$  就是一个光滑函数。其能量集中在低频部分，可以看成是低通滤波器的冲击响应。

如果选择的小波基为光滑函数的一阶导数，即

$$\phi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx} \quad (5.22)$$

$$\text{记 } \theta_k(x) = \frac{1}{k} \theta(x/k) \quad (5.23)$$

则信号  $f(x)$  的小波变换为

$$W_k f(x) = f(x) * \phi_k(x) = kd(f(x) * \theta_k(x)) / dx \quad (5.24)$$

由上式可以推出， $f(x)$  在不同尺度下的小波分解等价于  $f(x)$  被  $\theta(x)$  平滑后的一阶导数。因此变换后的小波系数的模在信号的突变点处取得局部极大值。随着小波分解尺度的增大，干扰信号引起的小波系数模的极大值迅速减少，信号真实突变点的小波系数模值会增大。这不仅使信号突变点的检测成为可能，而且可以消除随机噪声对信号的影响。

#### 5.4.2 用小波变换确定 g-r 噪声的转折频率

位于禁带中的深能级杂质中心是器件中 g-r 噪声的主要来源，根据 g-r 噪声的幅度和转折频率可以确定禁带中杂质能级的位置（或激活能）、浓度以及载流子俘获截面等重要参数。所以准确确定 g-r 噪声的转折频率显得更加重

要。但从图 3-14 和 3-16 却很难对  $g-r$  噪声的转折频率进行准确定位。我们对图 3-16 所示的  $g-r$  噪声进行小波变换, 采用 Daubechies-2 小波基, 对信号进行多尺度分解, 图 5-2 给出了不同尺度下的小波变换结果, (a) 是原始信号, (b)~(h) 分别为信号在不同尺度下分解后的低频重构信号。可见尺度加大后, 干扰信号的影响显著减弱, 而信号的低频概貌得以突出, 从小波分解的第 8 层重构信号 (如图 5-2 (b) 所示) 可以明显地看出,  $g-r$  噪声的转折频率在 33KHz 处。

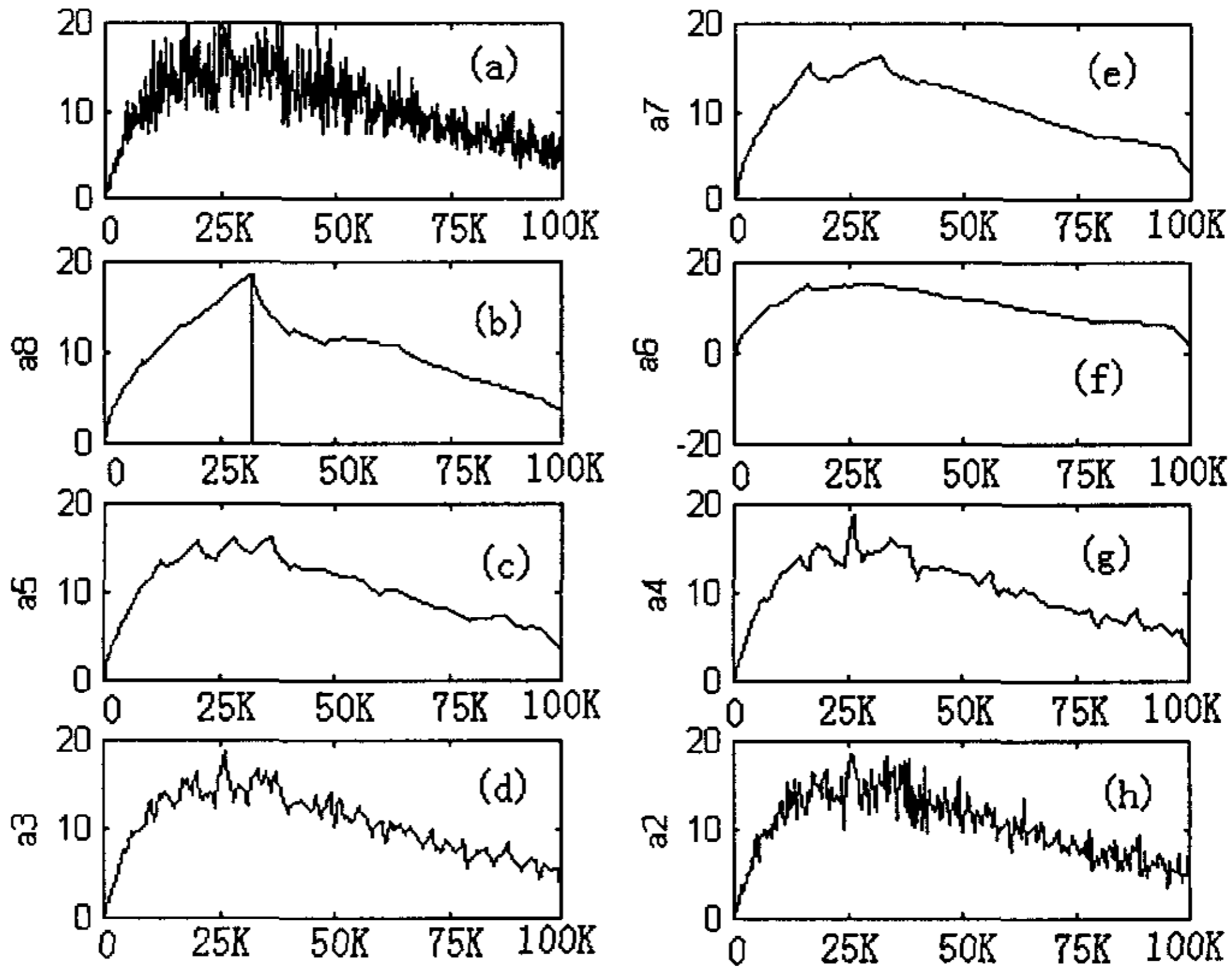


图 5-2 小波变换用于  $g-r$  噪声转折频率定位

#### 5.4.3 用小波变换分析好、坏器件的噪声信号

图 5-3(a), 5-4(a) 分别是一只好器件和一只已退化器件在  $I=20\mu A$  时的噪声信号。对这两个信号进行多尺度分析, 结果如图 5-3, 4 所示。可以明显

地看到，当分解到第六层(图 5-3(b), 5-4(b)所示)时，两只器件的低频概貌有了明显的差别，好器件的低频概貌信号较平稳，而坏器件则出现奇变。这样，通过小波分析确定器件噪声的低频概貌，可以方便地区分器件的好坏。

#### 5.4.4 用小波变换分析器件老化前后的噪声信号

图 5-5 (a), 5-6(a)是一只器件老化(80°C和 350mA 下老化 48 小时)前后的噪声信号，图 5-7 是相应的频谱图。可见器件老化前后的时域和频域图形基本上没有明显差别。甚至器件老化后的噪声比老化前还要小(图 5-7 所示)。图 5-5(b), 5-6(b)是小波变换后的第六层分解信号，从图中可以看出，老化后的器件噪声的低频概貌出现明显的奇变，表明器件老化后的性能有了一定的变化。对该器件继续老化，发现该器件很快就退化了。与器件噪声的时域和频域特征相比，在某些方面，噪声信号的小波变换结果对器件性能改变更敏感。

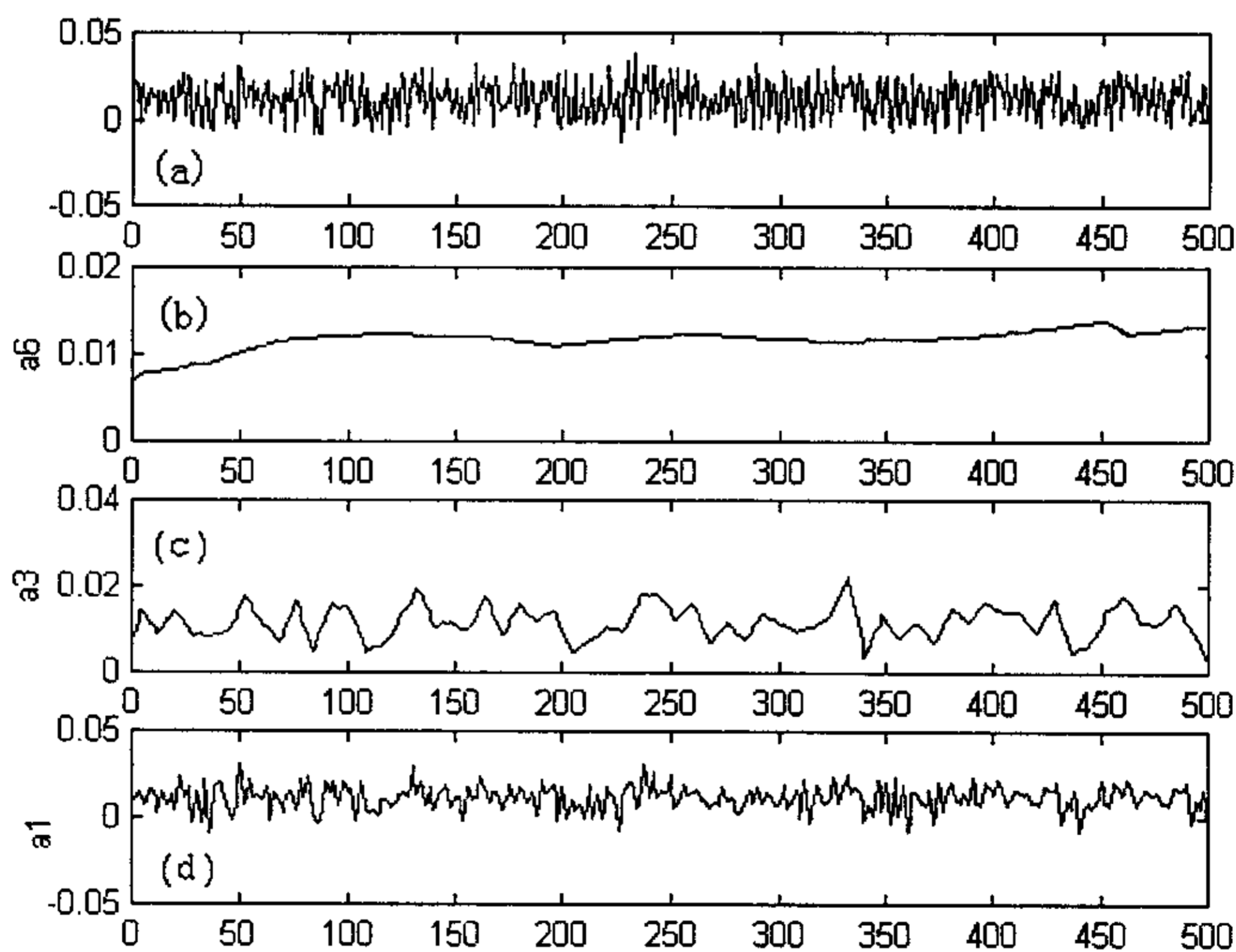


图 5-3 好器件的噪声原始信号及各层重构信号

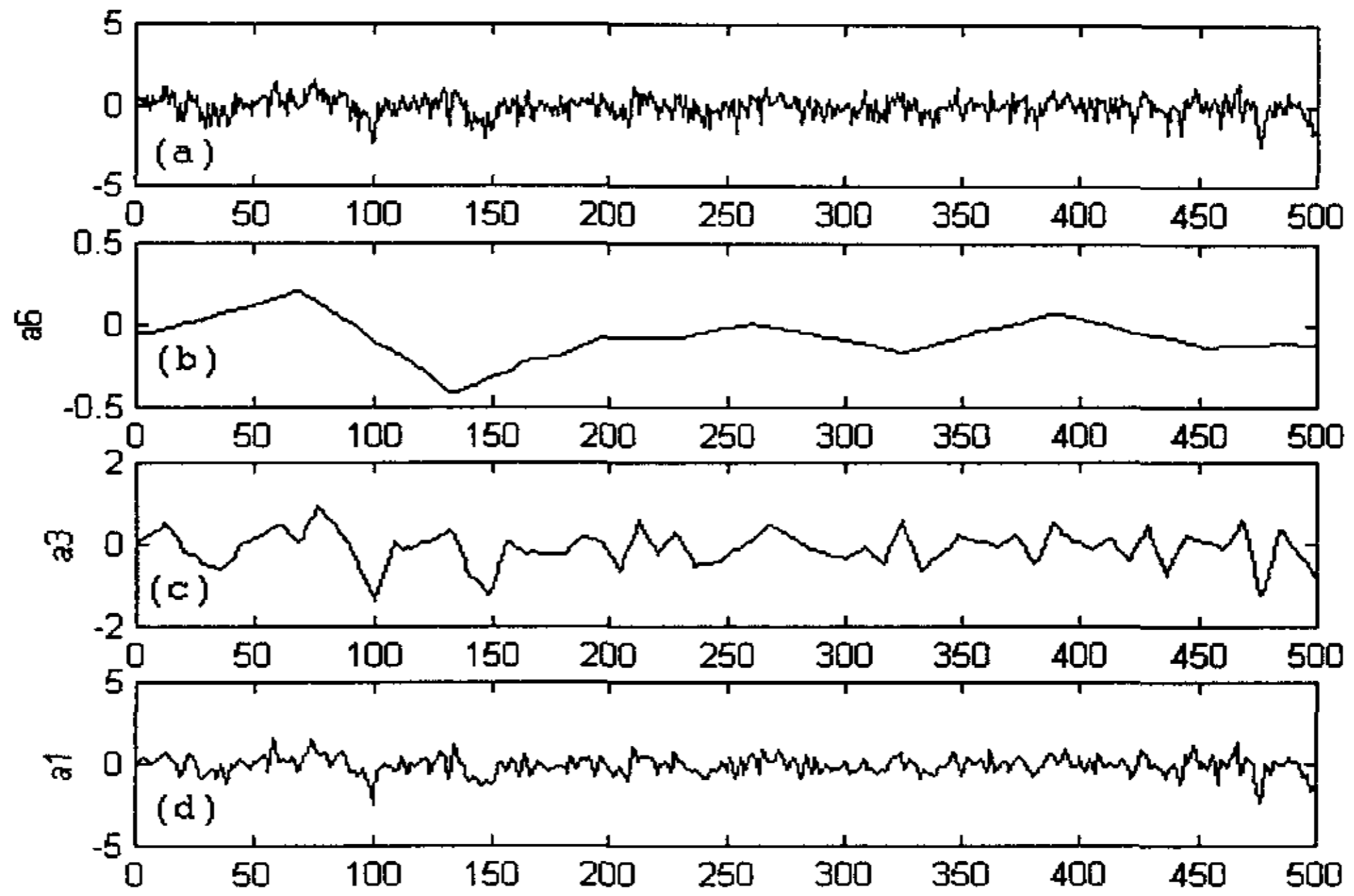


图 5-4 坏器件的噪声原始信号及各层重构信号

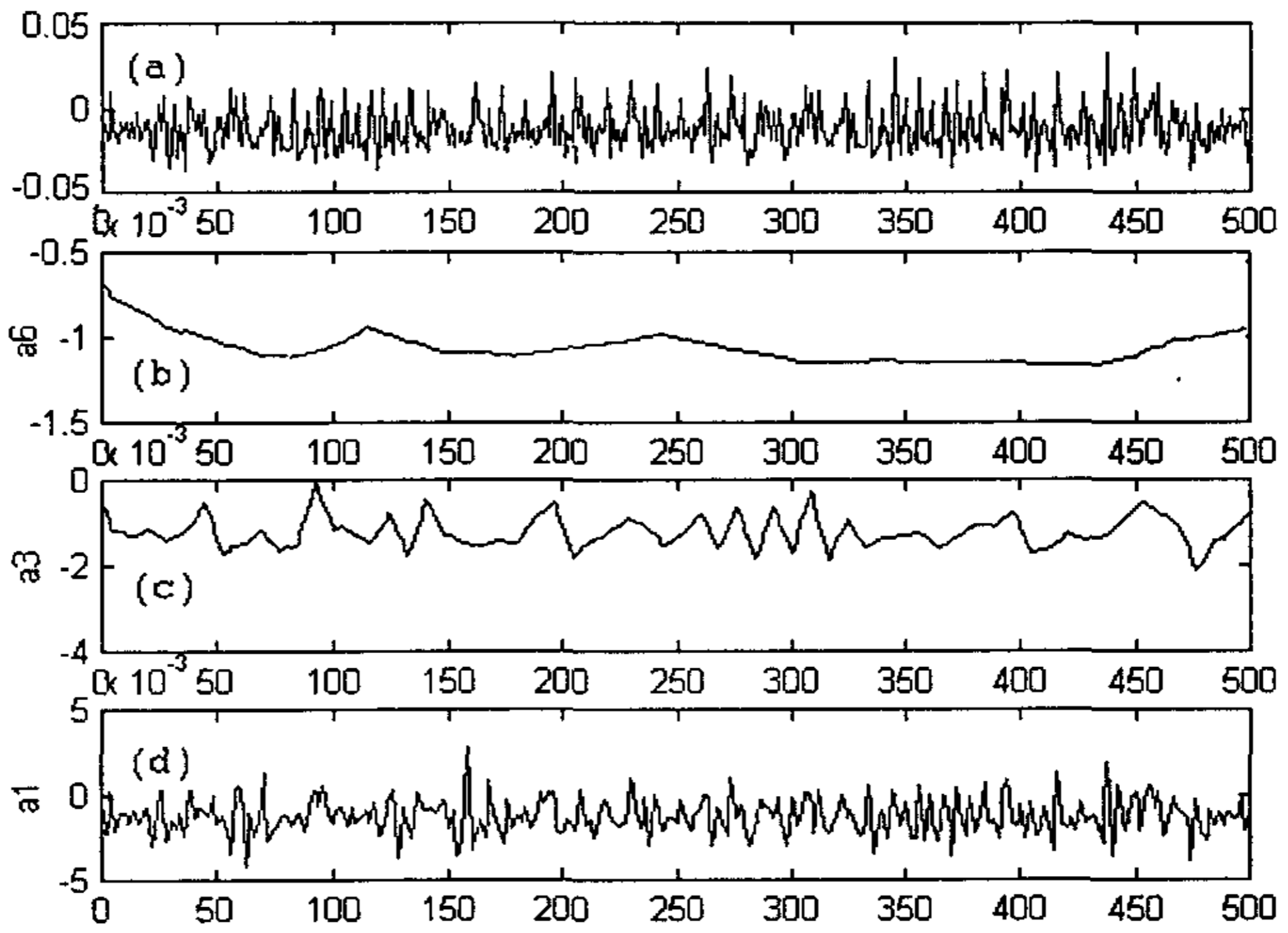


图 5-5 器件老化前的噪声原始信号及各层重构信号

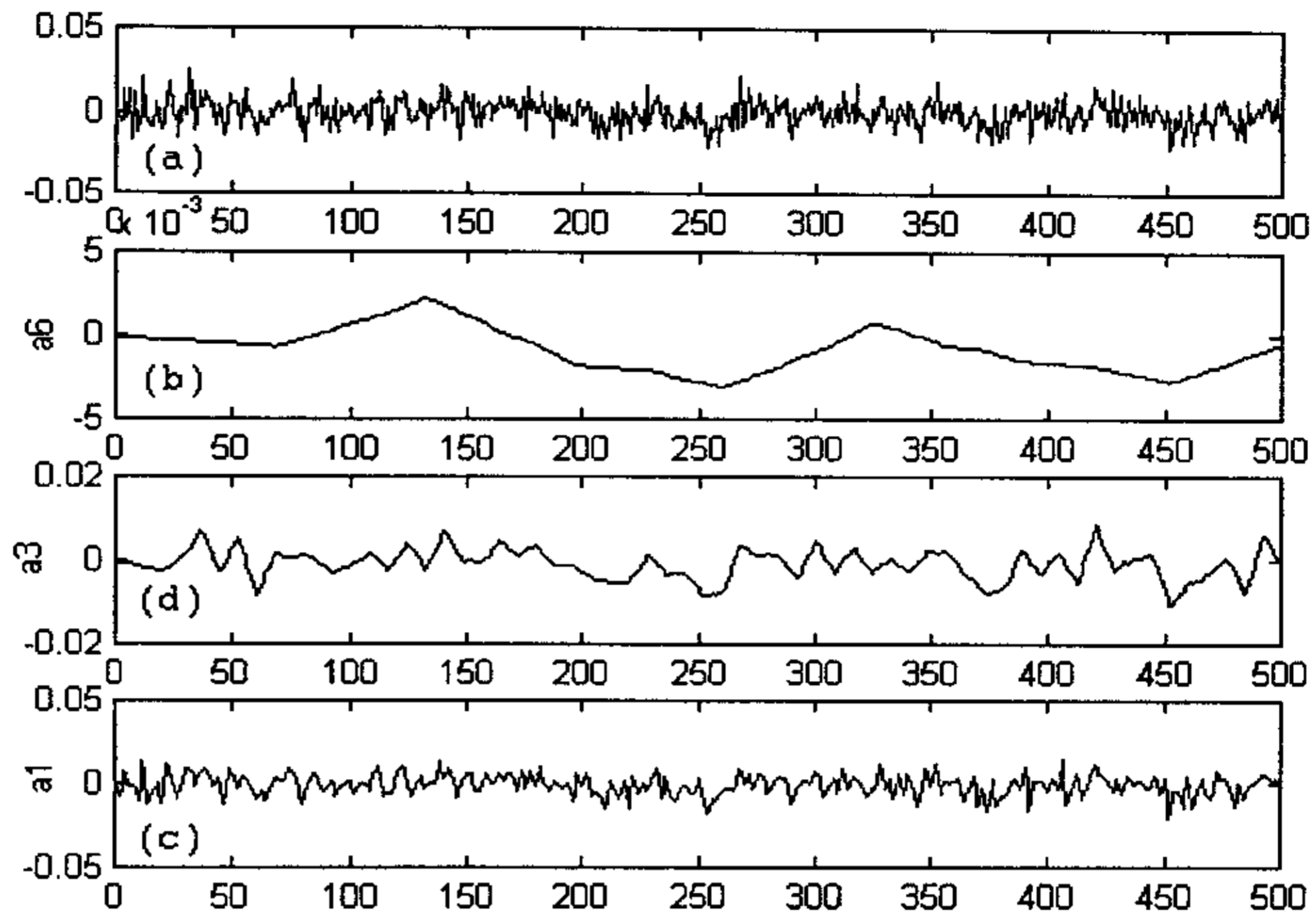


图 5-6 器件老化后的噪声原始信号及各层重构信号

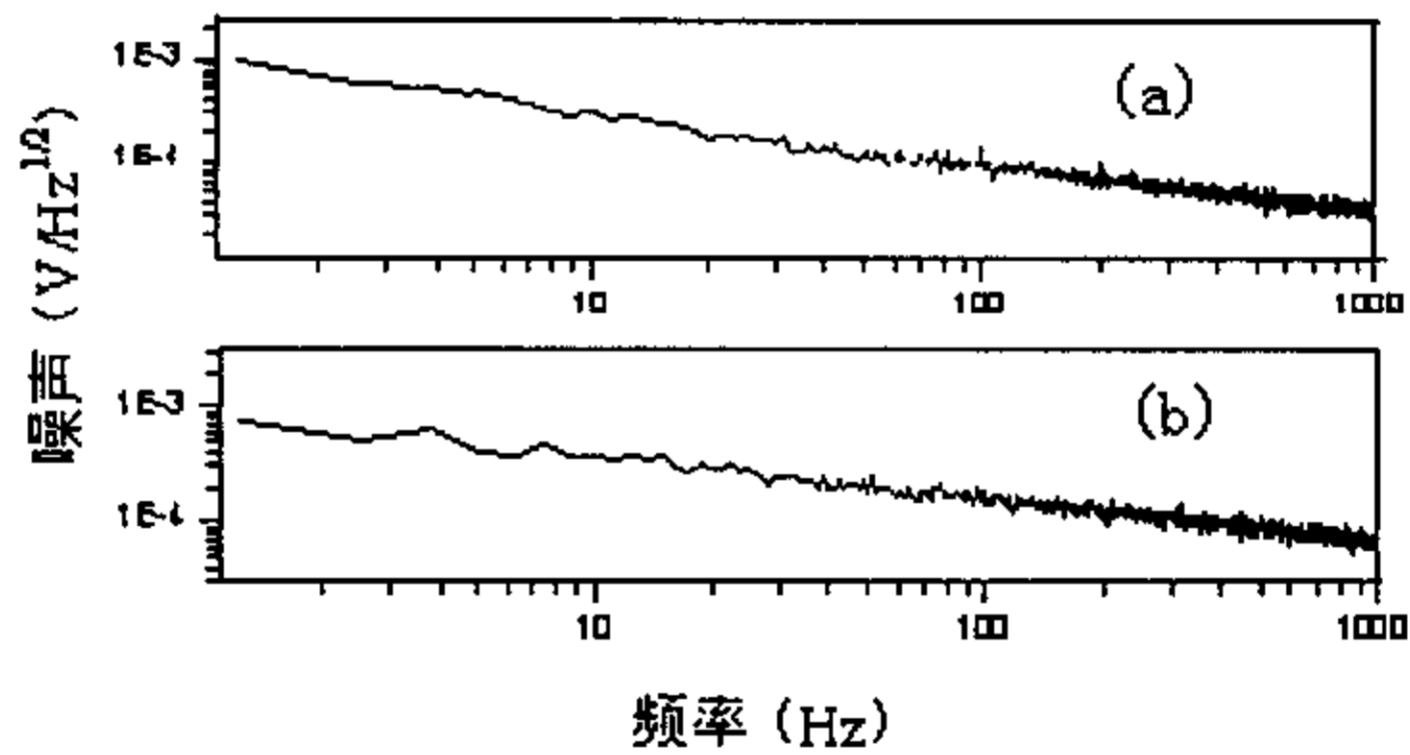


图 5-7 老化前后器件噪声的功率谱  
(a) 老化前, (b) 老化后

### § 5.5 小结

本章首先论述了小波分析的基本理论,然后用小波变换对半导体激光器的噪声信号进行了分析。利用小波变换时频局部化的特点,有效地提取了半导体

激光器噪声信号中的低频成分,即噪声信号中的  $1/f$  成分。而正是这部分噪声反映了器件的质量和可靠性。通过对噪声信号的多尺度分析,分析了不同器件噪声信号的奇异性,为器件的可靠性评价提供了新的途径。用小波变换对  $g-r$  噪声的转折频率进行了准确定位,取得了满意的效果。

参考文献:

- [1]Morlet J. Wave propation and sampling theory and complex waves. Geophysics. 1982, 47(2), 222-236.
- [2]M. Frisch and H.Messer, The use of wavelet transform in the detection of an unknown transient singals, IEEE Trans. on Information Theory, 1992, 38(2), 892-896
- [3]Lee S.Y., Gu Y.S., Szu H.H. Fractional Fouier transforms, wavelet transform, and adaptive neural networks. Optical Engineering, 1994, 33(7), 2326-2330.
- [4]Philippe D, Benoit M, Dirk T.M. Singal-adapted multiresolution transform for image coding. IEEE on Information Theory, 1992, 38(2), 897-904.
- [5]Gregory Wornell, Alan V. Oppenheim. Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets. IEEE on Information Theory, 1992, 40(3), 611-623.
- [6]M. Farge, Y. Guezennee, C.M. Ho et al. Continuous wavelet analysis of coherent structuraes, Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Progarm, 1990.
- [7]G. Wornell, Wavelet - based representations for  $1/f$  family of fractal process, Proc. IEEE, 1993, 81, 1428-1450
- [8]李建平, 小波分析与信号处理, 重庆, 重庆出版社, 1997.

## 结 束 语

本文首先概述了半导体激光器的噪声特性，介绍了半导体激光器噪声常用的测量方法，以直接测量法为基础，结合互谱技术，建立了半导体激光器噪声测试系统。在此基础上，首次开展了噪声用于半导体激光器质量表征和可靠性筛选等方面的研究工作。本文的创造性工作包括以下几个方面：

1.以直接测量方法为主，结合互谱技术，建立了半导体激光器噪声测试系统。测试系统的本底噪声小于  $1\text{nV/Hz}^{1/2}$ ，采用互谱技术后可达到  $0.1\text{nV/Hz}^{1/2}$ 。

2.开展了噪声用于半导体激光器质量表征和失效机理分析等方面的研究。首次测量和分析了器件表面状况改变对噪声的影响。分析了表面态，界面态、内部缺陷、串并联电路、应力对器件噪声的影响，这对确定噪声来源进而分析器件失效机构具有指导意义。首次讨论了器件在小注入下噪声与器件表面电流间的相关性。在不同条件下，观测了器件噪声和表面复合电流的变化情况，结果表明器件噪声与表面复合电流有着相同的变化趋势。

3.首次将器件在小注入 ( $I=20\mu\text{A}$ ,器件处于为导通状态) 下的噪声引入半导体激光器的可靠性筛选，提高了筛选的准确率。70 余只器件的噪声测试和老化实验表明，把器件在小注入下的噪声大小作为器件可靠性筛选的判据之一，提高了筛选的准确率。从测试电流和判据选择以及噪声判决阈值确定等方面提出了提高筛选准确性的新措施，并与实际老化结果进行了对照。

4.首次将小波变换引入半导体激光器的噪声信号分析和器件可靠性评价。小波变换具有空间局部化性质，能有效地区分信号的突变部分和噪声，利用小波变换，有效地提取了半导体激光器噪声信号中的  $1/f$  成分，而正是  $1/f$  噪声反映了材料或器件的不完整性，与器件质量密切相关。另外，利用小波变换的时频局部化特性，对噪声信号进行了多尺度分析，准确定位了器件  $g-r$  噪声的转折频率。利用小波变换分析了不同器件的噪声信号，并根据分析结果对器件的可靠性进行了评价。结果表明，小波变换在获取信号细节方面有着巨大优势。这也为半导体激光器噪声信号分析和器件可靠性评价提供了一个新的手段。

## 致 谢

本论文是在石家纬教授的悉心指导下完成的,石老师渊博的知识和求实的工作态度使我受益菲浅,使我的专业水平有了一次飞跃。论文从选题到定稿,自始至终得到石老师的精心指导,倾注了石老师大量的心血和汗水。论文期间,石老师不仅教导我如何做学问,更教导我怎样做人,他那谦和的性格和严谨的工作作风更对我以后的学习和工作产生深远的影响。在此向石老师表示衷心的感谢!

感谢衣茂斌教授、贾刚教授在半导体物理和器件物理方面给予的指导和有益讨论,感谢郭树旭教授在小波分析方面给予的指导和有益讨论。感谢杨小松硕士在小波编程和数据处理方面给予的具体帮助。感谢常诚,郑云平同学在数据测试和整理等方面给予的帮助。

在本论文的研究过程中,张大明博士,薄报学博士,曲轶博士,张素梅博士,张峰刚硕士,刘建军硕士,王伟硕士和已毕业的赵磊硕士,路羽硕士,李永军硕士等都给予了我热情支持和帮助,在此一起向他们表示诚挚的感谢。

我要真诚地感谢我的家人,论文的顺利完成与他们的理解与支持是分不开的。

最后,向所有在论文完成过程中关心、鼓励、支持和帮助过我的老师、同事、同学和朋友表示感谢!能和他們在一起学习我感到非常高兴,他们使我度过了一生中最难忘也是最美好的日子。

## 博士论文期间发表的论文及成果

### 一. 论文

1. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al. High-power Quantum Well Remote Junction Laser and Its Electrical Noise Characteristics. *Optical & Laser Technology*, vol.33, no.4, p231-235, 2001
2. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Qi Liyun et al. Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and devices quality. *Proceedings of SPIE* vol.4220,PP217-220, 2000
3. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al, Low-frequency electrical noise as reliability estimation for high-power semiconductor lasers. *Optical and Quantum electronics*. 已接收。
4. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al, Correlation between the low-frequency electrical noise of high-power quantum well lasers and devices surface non-radiative current. *Microelectronics Reliab.* 已接收。
5. 胡贵军, 石家纬, 张素梅等, 808nm 高功率半导体激光器的低频电噪声及其与器件质量的相关性, *光子学报* Vol29(Z1),2000, P191-194
6. 胡贵军, 石家纬, 张素梅等, 半导体激光器电噪声与非辐射复合电流的相关性. *半导体光电* VOL.22, no.1, p12-14, 2001
7. 胡贵军, 石家纬, 张素梅等, 808nm 高功率远结激光器及其电噪声特性 *功能材料与器件学报* VOL.6 no.3 2000. P279-281
8. 胡贵军, 石家纬, 李红岩等, 808nm 大功率半导体激光器低频电噪声 *吉林大学自然科学学报* No.3, 2000, p58-60.
9. 胡贵军等, 半导体激光器噪声的测量, *半导体技术*, 2001, 26 (1), 53-56
10. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et a. Correlation between low frequency electrical noise and surface non-radiative current for quantum well lasers with high power. *Semiconductor photonics and technology*. 已接收。
11. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al. The low-frequency terminal electrical noise of high power quantum well lasers and facet stability. *Proceedings of SPIE* vol.4602A. 已接收
12. **Hu Guijun**, Shi Jiawei, Zhang Sumei et al. The electrical noise used to estimate the reliability of high power semiconductor lasers. *Proceedings of SPIE* vol.4580. 已接收
13. 胡贵军, 石家纬. 半导体激光器的电噪声. *半导体光电*. 已接受

14. 石家纬, 齐丽云, 李红岩, 胡贵军等. GaAs/GaAlAs 高功率量子阱激光器的退化. 第三届全国光子学学术会议论文集, 昆明. P183, 2000.
15. 石家纬, 张素梅, 齐丽云, 胡贵军等. 高功率 GaAs/GaAlAs 单量子阱远结激光器. 功能材料与器件学报 VOL.6 no.3 2000. P240-242
16. 郭玉彬, 胡贵军, 邹念育, 叶修齐, 杨文礼. 全光纤波分复用传输系统. 长春邮电学院学报 Vol.17, no.4, 1999, p1-6
17. 郭玉彬, 叶修齐, 赵峻彦, 胡贵军, 郭滨. 一种密集波分复用上/下话路全光环形网模型. 长春邮电学院学报 Vol.16, no2, 1999, p6-14
18. 李晓滨, 赵晓晖, 胡贵军, 李丽君, 杨春艳. 全光码分多址通信系统地址码研究. 长春邮电学院学报 Vol.17, no.2, 1999, p6-11
19. 李晓滨, 赵晓晖, 胡贵军. 光硬限幅器在光码分多址通信系统中的应用. 长春邮电学院学报 Vol.17, no.3, 1999, p1-6.
20. 张素梅, 石家纬, 齐丽云, 胡贵军. 高功率 GaAs/GaAlAs 单量子阱远结激光器及其退化. 飞通光电子技术. 2001, 1 (1), 7-10

## 二. 项目

1. 高功率量子阱远结激光器  
吉林省科委项目。1999年8月—2001年12月。主要参加者。
2. 高功率量子阱激光器噪声特性研究  
国家重点实验室访问学者基金。2000年1月—12月。负责人。
3. 噪声用于980nm大功率半导体激光器可靠性检测和失效时间预测的研究  
华为科技基金项目。1999年4月—2001年4月。负责人。
4. 高功率半导体激光器可靠性及其失效因素研究  
长春光机学院高功率半导体激光国防重点实验室基金项目, 参加者。
5. 高功率远结半导体激光器及其可靠性研究  
长春光机学院高功率半导体激光国防重点实验室基金项目, 参加者。
6. 大功率量子阱远结半导体激光器  
教育部博士点基金, 参加者。

## 摘 要

随着光电子技术的发展，半导体激光器作为一种重要光源，在光纤通信、光传感、信息存储，医疗以及泵浦固体激光器和光纤放大器等领域得到广泛应用。作为重要部件的半导体激光器是否可靠是应用系统能否可靠工作的关键。研究半导体激光器的可靠性及其规律对于改善其性能和正确使用器件有着重大意义。目前半导体激光器通常采用电老化方法进行可靠性评价和筛选。在电老化过程中，好的器件也要经受考验，受到热、电冲击，使器件寿命缩短。在长时间电老化过程中如果遇到系统失控或停电等意外情况，会使器件成批损坏，损失将是严重的。而且电老化对器件中的潜在缺陷不敏感。表现为：电老化筛选认为合格的器件在使用过程中也会发生快速失效。因此如何制备高可靠器件、如何分析影响器件可靠性的因素以及如何把不合格器件（包括具有潜在缺陷的器件）快速、无损、方便地筛选出去是亟待解决的问题。

半导体激光器在工作时，其两端的 pn 电压会出现随机涨落，称为电噪声。电噪声反映了材料或器件的不完整性，特别是对影响器件可靠性的潜在缺陷极为敏感，在器件质量表征和可靠性评价方面显示出了巨大潜力。

本文首先综述了半导体激光器的噪声特性，特别是对激光器电噪声作了重点论述，包括电噪声的种类、特点、产生机制、主要应用等。然后介绍了半导体激光器噪声常用的测量方法，以直接测量法为基础，结合互谱技术，建立了半导体激光器噪声测试系统。在此基础上，开展了噪声用于半导体激光器质量表征和可靠性筛选等方面的研究工作。具体包括以下几个方面：

1. 首次开展了噪声用于大功率半导体激光器质量表征和失效机理分析等方面的研究。测量和分析了器件表面状况改变对噪声的影响。分别对器件表面进行钝化、HF 腐蚀、Na<sup>+</sup>沾污处理，观测了表面处理前后的噪声变化和 V-I 特性变化。腔面处理后，器件噪声和器件在小注入下的 V-I 特性变化明显。这表明器件在小注入下的噪声大小在很大程度上取决于电流中的表面成分多少，与表面状况密切相关，可以用来评价器件表面的质量及可靠性，是一种快捷、有效、无损的新方法。首次讨论了器件在小注入下噪声与器件表面电流间的相关性。在不同条件下，观测了器件噪声和表面复合电流的变化情况，结果表明器件噪声与表面复合电流有着相同的变化趋势。分析了表面态，界面态、内部缺陷、串并联电路、应力对器件噪声的影响。实验和理论相结合，分析了器件噪声的产生机理，这对确定噪声来源进而分析器件失效机构具有指导意义。

2.首次将器件在小注入 ( $I=20\mu\text{A}$ ,器件处于为导通状态) 下的噪声引入半导体激光器的可靠性筛选,提高了筛选的准确率。制约器件可靠性的一个重要因素就是器件表面状况的好坏,表面缺陷、位错或表面态较多,导致表面复合加强,产生局部加热使腔面退化,进而使器件退化。有源区内存在缺陷, pn 结周围界面不完善,也是器件缩短寿命的重要原因。欧姆层、波导层、包层的质量不好也将严重影响器件的可靠性。而这些因素都是器件噪声的重要来源,其中表面状况好坏和有源区缺陷的多少与小注入下的噪声 ( $S_{v1}$ ) 有关,欧姆层,波导层,包层的不完善和后工艺不理想与较高注入下的噪声 ( $S_{v2}$ ) 有关。所以,噪声用于器件可靠性筛选时,既应考虑  $S_{v1}$  也应考虑  $S_{v2}$ 。70 余只器件的噪声测试和老化实验表明,把器件在小注入下的噪声大小作为器件可靠性筛选的判据之一,提高了筛选的准确率。

3.运用概率论理论,通过分析噪声的分布,并与部分抽样器件的老化结果相结合,给出了噪声可靠性筛选的判据阈值,这为选择噪声判据阈值提供了一个新途径。

4.首次将小波变换引入半导体激光器的噪声信号分析和器件可靠性评价。小波变换具有空间局部化性质,能同时在时频域中对信号进行分析,它能有效地区分信号的突变部分和噪声,所以利用小波变换,可以有效地提取半导体激光器的噪声信号的  $1/f$  成分,而正是  $1/f$  噪声反映了材料或器件的不完整性,与器件质量密切相关。另外,利用小波变换的时频局部化特性,对噪声信号进行了多尺度分析,准确定位了器件 g-r 噪声的转折频率。利用小波变换分析了不同器件的噪声信号,并根据分析结果对器件的可靠性进行了评价。结果表明,小波变换在获取信号细节方面有着 Fourier 变换无法比拟的优势。

5.以直接测量方法为主,结合互谱技术,建立了半导体激光器噪声测试系统。采用双重屏蔽技术,即内屏蔽采用浮地方式消除地流环,外屏蔽采用多点接地以消除电磁场的干扰。有效地抑制了外界干扰对测量结果的影响。测试系统的本底噪声小于  $1\text{nv}/\text{Hz}^{1/2}$ ,采用互谱技术后可达到  $0.1\text{nv}/\text{Hz}^{1/2}$ 。采用大容量电瓶为激光器提供驱动电流,采用适当的滤波和分压技术,使驱动电路既可以提供  $10\mu\text{A}-600\text{mA}$  宽范围驱动电流,又有效地减少了驱动电流涨落对测试结果的影响,取得了满意的效果。

6.测量了 808nm 和 980nm 大功率 LD 的低频电噪声,结果表明两种器件具有基本相同的电噪声特性,即器件的低频噪声主要表现为  $1/f$  特性,且在阈值附近有最大值。

## Abstract

With the rapid development of opto-electronic technique, semiconductor lasers (LDs) are widely used in optical fiber communication, optical sensor, information memory, medical treatment and pumping solid lasers. As a kind of important light source, the reliability of semiconductor lasers is imperative in all the applications. The study on the reliability of LDs and its regularity is very important to improve their specific property and use them rightly. At present, the usual method of screen is electric aging in which all devices are aged with a constant power or a constant current under high temperature and then the early failed devices are selected. In the aging, the reliable devices are also subject to screening, and the lifetime of devices is affected because of the hot and electric hurt. It can cause batches of devices damage when some accident happens, for instance, the out of control system or power cut. On the other hand, electric aging is not sensitive for latent defects, for example, some devices after electric aging screening are usually found fail rapidly. Thus, the urgent problems are how to manufacture the high reliable devices, how to analyse the factors which affect the device reliability, and how to select the unqualified devices with a fast, nondestructive and conveniently method.

When the semiconductor laser is operating in a constant bias current, the terminal voltage of the device often fluctuates. The fluctuation that is named electric noise indicates the imperfections of material or device, especially, it is very sensitive for various reliability-dependent defects. So the electric noise is becoming a useful tool to characterize device quality and reliability.

First, the noise characteristic of semiconductor lasers is reviewed, especially, the electric noise characteristic is mainly summarized. Secondly, the measuring methods of noise in semiconductor lasers are introduced. Based on direct measuring and cross-spectrum measuring methods, we construct the measuring system of noise in semiconductor lasers. Next, the work on noise used to characterize quality and reliability of semiconductor lasers is first studied. The

main research contents of this paper are shown bellow:

1. Noise in semiconductor lasers is first used as a diagnosis tool for device quality and reliability. We do different treatments for facet surface, such as passivation, HF etching,  $\text{Na}^+$  contamination. The noise and V-I characteristic are measured before and after facer treatments. After facet treatments, the noise and V-I characteristic of the devices operating in low injection change evidently, which indicate that the noise level in device operating in low current is mainly caused by the surface component level of the current, and has closely relation with device quality. So the noise level in device operating in low current can be used to estimate the stability of device facet, which is a fast, nondestructive method. The effect of surface state, interface state, stress, temperature, defects on noise is discussed. And generating mechanisms of noise is analyzed.

2. The noise level in device operating in low bias current ( $I=20\ \mu\text{A}$ , the device operating in un-conducting state) is first used as a criteria for reliability screen of semiconductor lasers, which improves the screen accuracy. One of important factors that affect device quality and reliability is stability of facet. If there are defects enhancing surface recombination at facet, the device will degrade rapidly. Other factors such as the defects in active region, the imperfect of pn junction, are also important factors affecting device reliability. On the other hand, the imperfect in waveguide layer, cap layer and ohm contact layer is also relate closely with device quality. And all these factors contribute to device noise level. Defects level in facet and active region is related with the noise level( $Sv_1$ ) of device operating in low bios current, while the imperfect in waveguide layer, cap layer and ohm contact layer is related with the noise level( $Sv_2$ ) of device operating in higher bias current.. So when noise is used as device reliability screen, both  $Sv_1$  and  $Sv_2$  should be considered. The noise measuring and aging results of 70 semiconductor lasers confirm that  $Sv_1$  is very important for improving screen accuracy.

3. Probability law together with aging results of some devices is used to select the noise criteria threshold for device reliability screen, which gives a novel method to select noise criteria.

4. Wavelet is first used analyses noise signal in semiconductor and estimate device reliability. Wavelet can analyses signal in time-frequency range at the same time. Based wavelet, we extract the  $1/f$  component in noise signal and determine accurately the corner frequency of g-r noise. We also analyses noise signal of different devices by multi-resolution analysis based on wavelet, and estimate the device reliability according to the analysis results.

5. Based on direct measuring and cross-spectrum measuring technology, the measuring system of noise in semiconductor lasers is constructed. In order to improve accuracy of measuring results, the double shield and proper ground connect technique are used. The background noise of the measuring system is less than  $1\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ . After using the cross-spectrum technique, the background noise is  $0.1\text{nV}\cdot\text{Hz}^{1/2}$ . We use storage battery to supply bias current for LDs, the wide bias current range of  $10\mu\text{A}$ - $600\text{mA}$  is obtained, at the same time, the fluctuation of bias current is eliminated.

6. The low frequency electric noise in  $808\text{nm}$  and  $980\text{nm}$  high-power LDs is measured. The results indicate that the electric noise characteristic of the two kinds of devices is similar, that is to say that the low frequency electric noise of the devices is mainly  $1/f$  noise and has maximum value around the threshold.