

半导体激光器光输出噪声测量及 与电噪声的相关性*

戴逸松 徐建生 张新发

石家伟 金恩顺

(吉林工业大学电子工程系, 长春 130025) (集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学区, 长春 130023)

提要 采用互谱估计方法测量了半导体激光器的微弱电噪声谱及光噪声谱。结果表明两者在超辐射区有较强的相关性。对光噪声的形成机理分析证明由载流子起伏形成的光噪声与电噪声完全相关, 而由外量子效率起伏引起的光噪声与电噪声是不相关的。

关键词 半导体激光器, 光噪声, 电噪声, 相关

1 引 言

半导体激光器的噪声包括散弹噪声、热噪声及低频噪声, 其中低频噪声包括 $1/f$ 噪声及生长-复合噪声($g-r$ 噪声)。激光器的噪声不仅是决定光通信系统质量及接收机信噪比的重要因素, 而且可以根据其低频噪声大小来评估器件的可靠性及质量^[1,2]。

激光器噪声研究的一个重要内容是其光、电噪声的相关性研究, 它可有助于深入了解激光器光输出噪声的形成机理, 并进而通过对电噪声测量来估计光噪声的大小及特征。目前, 对激光器的电噪声与光噪声的相关性研究已经发表了一些有价值的研究成果^[3~5]。文献[3]测量了光、电噪声的时间波形的相关系数, 证明两者的相关系数为 0.6。文献[5]测量了激光器光、电噪声的谱相关系数, 证明在超辐射区两种噪声有一定的相关性, 但激光器工作于阈值电流以上, 互相关系数反而减少。对这种现象, 文献[6]认为可能是在激光区工作时, 所产生的激光与噪声无关。

文献[5]不足之处是仅测量频率为 100 kHz 的谱相关系数。本文的目的是建立对激光器微弱的光、电噪声谱测量装置。通过对批量 V 沟 InP/InGaAsP 激光器的低频噪声谱测量, 给出了激光器光、电噪声在 1 Hz 至 100 kHz 低频段的谱相关性的新的实验结果。最后从光噪声的产生机理论证了两者之间的相关性。

* 本课题由集成光电子学国家重点联合实验室资助。

收稿日期: 1993 年 6 月 24 日, 收到修改稿日期: 1993 年 9 月 6 日

2 半导体激光器的噪声谱测量装置

半导体激光器噪声测量的主要困难是被测激光器噪声太小,因此对探测器及前置放大器除了要求良好的屏蔽及接地外,还应有很低的等效输入噪声。常规的噪声测量装置(前置放大器加谱分析仪)很难得到准确的测量结果。为此我们采用双通道前置放大器的互谱测量方法。图 1 为电路图。开关 K 打向 1 时测量激光器的电压噪声功率谱 $S_v(f)$,再根据 $S_v(f) = R_d^2 S_{I_d}(f)$ 计算激光器的电流噪声谱 $S_{I_d}(f)$ 。 I_d 为激光器的驱动电流, R_d 为激光器的动态电阻。当开关 K 打向 2 时,测量电阻 R 两端的电压噪声功率谱 $S_p(f)$,再根据 $S_p(f) = R^2 S_i(f)$ 计算锗光电探测器 D 的光电流噪声谱 $S_i(f)$ 。

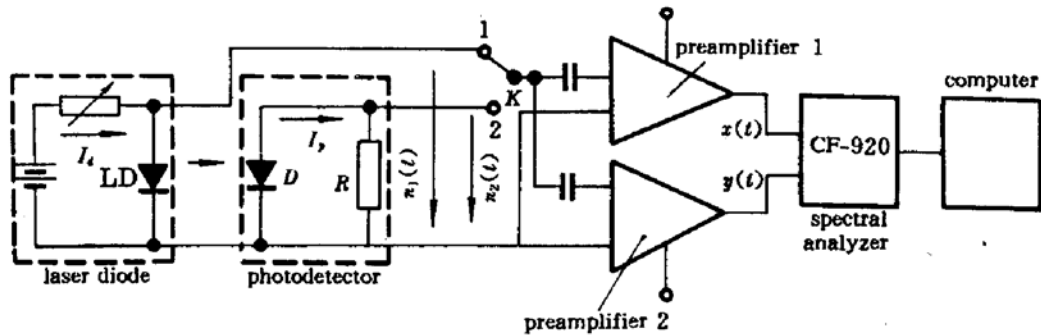


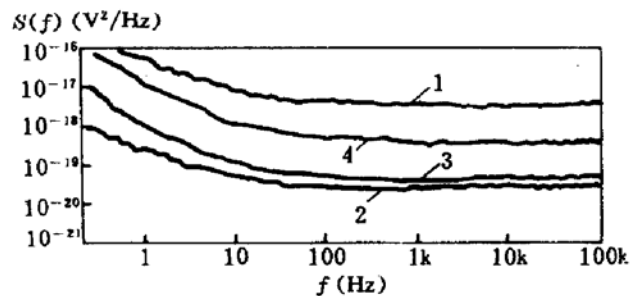
Fig. 1 The drawing of light output noise and electrical noise spectral measuring system

由于双通道放大器采用电池分别供电,故双通道输出的前放噪声、零漂互不相关。测量输出信号 $x(t)$ 及 $y(t)$ 的互功率谱 $S_{xy}(f)$ 即可抑制前放噪声,得到被测的噪声功率谱。

$$S(f) = \frac{S_{xy}(f)}{K_1 K_2} \tag{1}$$

K_1, K_2 为双通道放大器的增益。实测结果表明本装置可测量比前放噪声小一个数量级的微弱噪声。图 2 给出测量结果,曲线 1 为低噪声前放的等效输入噪声的电压谱,在 100 kHz 时谱密度为 $3.61 \times 10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。曲线 2 为互谱测量装置的等效输入噪声电压谱,在 100 kHz 时谱密度为 $2.33 \times 10^{-20} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。曲线 3 为本装置接入光探测器后的等效输入噪声电压谱(这里包括探测器的暗电流噪声),在 100 kHz 时谱密度为 $5.29 \times 10^{-20} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。曲线 4 为 V 沟 InP/InGaAsP 激光器(#20)的光噪声测量结果,驱动电流 $I_d = 34 \text{ mA}$,光电流 $I_p = 6 \mu\text{A}$,在 100 kHz 时光噪声电压谱 $S_p(f)$ 为 $5.9 \times 10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。可见激光器的光噪声比前放噪声小一个数量级,因此用常规方法无法测量。但比本装置(包括探测器的暗电流噪声)的噪声大一个数量级,可见对激光器的微弱噪声准确测量是可行的。

Fig. 2 The noise spectrum measurement of a laser diode
 curve 1: The equivalent input noise spectrum of low noise preamplifier;
 curve 2: The equivalent input noise spectrum of cross spectrum measurement set-up;
 curve 3: The noise spectrum of dark current of photodetector and cross spectrum set-up;
 curve 4: The optical noise spectrum of laser diode (No. 20)



3 半导体激光器光、电噪声相关性实验结果

文献[5]测量了半导体激光器在 100 kHz 频率的光、电噪声谱相关系数,证明激光器在超辐射区内具有相关性。本文测量了半导体激光器的低频段光、电噪声谱,并从几个方面证明二种噪声的相关性。

半导体激光器样品为 30 只 V 沟 InP/InGaAsP 双异质结半导体激光器。图 3 给出 #5 激光器的 $S_V(f)$ 及 $S_I(f)$ 在 1 Hz 点的谱密度有效值与驱动电流 I_d 的关系。图中同时给出 I_r 与 I_d 的关系。阈值电流 $I_{th} = 22$ mA,注意本图噪声谱密度坐标采用有效值(nV/\sqrt{Hz})表示。由实验结果对噪声相关性分析如下。

(1) $I_d < I_L$ 。此时激光器处于 LED 工作状态,称为荧光区。即 PN 结内电子空穴对复合产生的光子处于自发辐射状态。相应的光电流 I_r 及光噪声均很小,因此一般不讨论光、电噪声的相关性问题。

(2) $I_L < I_d < I_{th}$ 。激光器处于自发辐射向受激辐射转变,又称为超辐射区,由于受激产生光电子进一步增强,故光电流及相应的光噪声将显著增强。因此在这个区域内光噪声及电噪声将随 I_d 同时增加,可见两者一定存在较强的相关性。这里要注意,图 3 中 S_V 是激光器两端电压噪声谱。由于激光器动态电阻 $R_d \sim 1/I_d$,故根据 $S_V = R_d^2 S_I$,可见 S_I 与 I_d 是同时增加的。

(3) $I_d > I_{th}$ 。激光器处于激光状态,图 3 的实验结果表明,随 I_d 增加 S_I 增大,但 S_V 减少。这个现象在文献[6]中已指出,由于激光本身对 $1/f$ 噪声不作贡献,因此在激光器中随着受激辐射增强,光噪声反而减少。

下面我们从低频噪声谱形状来考察半导体激光器光、电噪声的相关性。图 4 给出 #5 激光器光、电噪声的噪声谱曲线,频率范围为 1 Hz 到 100 kHz,曲线 1 为电噪声谱 $S_V(f)$,曲线 2 为光噪声谱 $S_I(f)$ 。 $I_d = 22$ mA, $I_r = 10$ μ A。本图采用 $fS(f)$ 形式的原因是为了突出低频噪声中的 $g-r$ 噪声分量^[7]。由图可见,#5 激光器无论是电噪声还是光噪声均有 $g-r$ 噪声,而且二者谱形式相似,说明它们之间是相关的。但应该指出,二者谱形式不是完全相同,说明二者不是完全相关。

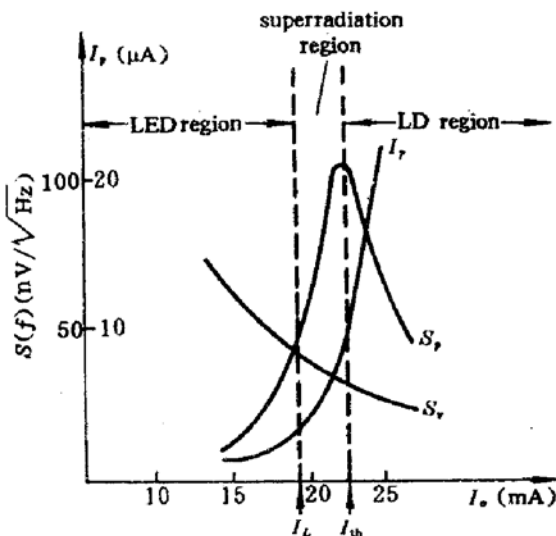


Fig. 3 The relation of light output noise and electrical noise to current I_d

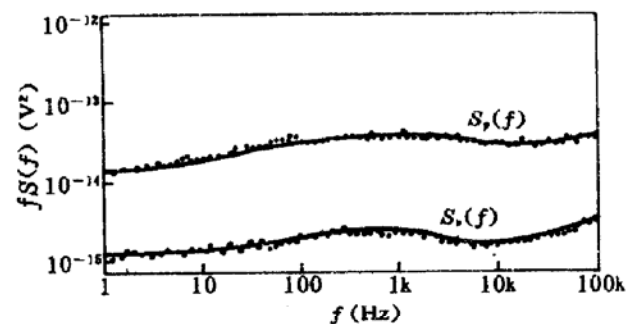


Fig. 4 The comparison between light output noise and electrical noise of laser diode

最后,我们通过对 30 只激光器的光、电噪声测量,统计观察二者的相关性。图 5 为 30 只器件在 1 Hz 点的光、电噪声值,可见电噪声大的器件,光噪声值也较大,说明两者有一定的相关性,但显然又不是完全相关的。

4 半导体激光器光、电噪声的相关机理

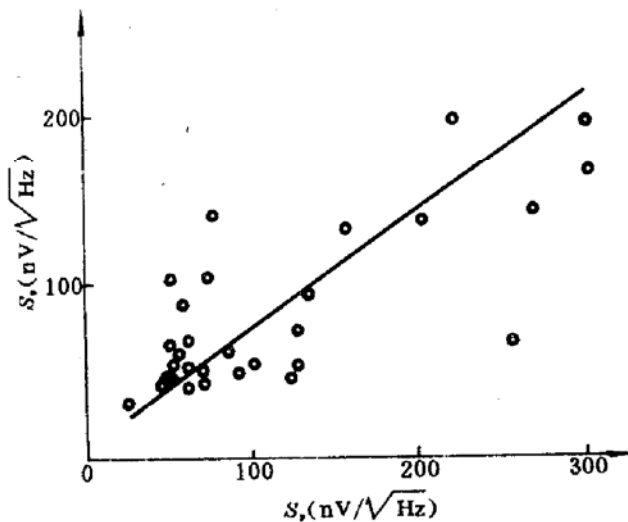


Fig. 5 The value of light output noise and electrical noise for 30 samples (at $f = 1$ Hz)

本节我们仅讨论激光器自发辐射形成的光噪声与电噪声的相关性(按文献[6]的观点,受激辐射形成的激光对 $1/f$ 噪声不作贡献,这里不予讨论)。PN 结自发辐射是注入的电子—空穴对复合产生光子的过程。对 PN 结施加正向偏压后,电子与空穴复合后会产生辐射跃迁和无辐射跃迁。其中辐射跃迁才能产生光子,再加上发光区内产生的光子向外发射时,可能被半导体再吸收或表面反射,最终只有一部分光子能射出来。定义发光的量子效率(又称外量子效率)为

$$\beta = \frac{\text{单位时间发射的光子数}}{\text{单位时间到达结区的电子—空穴对数}}$$

β 为小于 1 的数。设 \bar{N} 为单位时间平均注入的电子—空穴对, $\bar{\beta}$ 为平均外量子效率,则单位时间内发射的平均光子数 \bar{n} 为

$$\bar{n} = \bar{\beta}\bar{N} \quad (2)$$

显然 n , β 及 N 均是一种随机变量,从而形成了光噪声。单位时间发射的光子数 n 可表示为

$$n = \sum_{i=1}^N \beta_i \quad (3)$$

由式(3)可见,激光器的光噪声谱 $S_l(f)$ 可视为两部分组成,即

(1) 单位时间注入 PN 结电子—空穴对数 N 的随机起伏引起,其大小正比于 N 的方差 $\text{Var}N$ 。由于通过 PN 结的载流子起伏反映了通过激光器电流的噪声。可见这部分光噪声与电噪声是完全相关的。

(2) β 的随机起伏引起,显然其大小正比于 β 的方差 $\text{Var}\beta$ 。由于 PN 结区内自发辐射及光子在 PN 区内再吸收是一种与外界条件无关的随机过程,因此 β 的起伏与 N 的起伏无关。可见这部分光噪声与电噪声是不相关的。

根据 Burgess 方差定理,由式(3)可得到

$$\text{Var} n = (\bar{\beta})^2 \text{Var} N + \bar{N} \text{Var} \beta \quad (4)$$

由于激光器的光、电噪声大小与粒子起伏方差有关,即 $S_l(f) \sim \text{Var} n$, $S_e(f) \sim \text{Var} N$ 。因此由式(4)可以得到结论,激光器的超辐射区内光、电噪声为部分相关,但又不是完全相关,其不相关部分是由外量子效率起伏引起的。其次式(4)也说明激光器光、电噪声谱形式是相似的。

参 考 文 献

- 1 L. K. J. Vandamme, L. J. van Ruyven, Proc. 7th. Int. Conf. Noise in Physics, Edited by N. Savelli, G.

- Lecoy, J. P. Nougier, 1983, 245
- 2 L. A. Garmash, V. N. Morozov *et al.*. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1990, 20(8) : 882
 - 3 Shiyuan Yang, Torn Mizunami *et al.*. Proc. 11th. Int. Conf. Noise in Physics, Edited by T. Musha, S. Sato, M. Yamamoto, 1991. 321
 - 4 L. K. J. Vandamme, J. R. de Boer. Proc. 8th Int. Conf. Noise in Phys. Syst., Edited by A d' Amico, P. Mazetti, Amsterdam Netherland, 1986, 381
 - 5 B. Orsal, K. Raniriharinosy *et al.*. Proc. 10th Int. Conf. in Physical, 1989
 - 6 R. J. Fronen. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, 26(10) : 1742
 - 7 戴逸松. 半导体学报, 1989, 10(1) : 47

Measurement of Light Output Noise of Semiconductor Lasers and Its Correlation with Electrical Noise

Dai Yisong Shi Jiesheng Zhang Xinfu

(Jilin University of Technology, Changchun, 130025)

Shi Jiawei Jin Ensun

(National Integrated Optoelectronics Laboratory, Jilin University Region, Changchun 130023)

Abstract In this paper, the experimental set-up used for measuring the light output noise of a laser diode has been established. A weak electrical noise and light output noise can be measured by using the cross-spectrum approach. Experimental results obtained for 30 V-groove InP/InGaAsP lasers at frequency region from 1 Hz to 100 kHz demonstrated that the light output noise and electrical noise is correlative in the superradiation region, and its spectrum form is also similar. According to the mechanism of light excitation in LD, the light output noise has been discussed. The theoretical analysis shows that the light output noise is separated into two parts, one caused by carriers fluctuation is full correlative with electrical noise, another caused by light quantum fluctuation is uncorrelative with electrical noise.

Key words semiconductor laser, light output noise, electrical noise, correlation