

# II 型半导体激光放大器的噪声

李 林 林

(郑州大学)

## Noise in an injection locked semiconductor laser amplifier

Li Linlin

(Zhengzhou University, Zhengzhou)

**Abstract.** The noise spectra of an injection locked semiconductor laser amplifier (LA) are given.

### 一、引 言

II 型激光放大器 (LA) 可以用做光功率放大器, 也可以用做中继放大器代替复杂的光-电中继器<sup>[1]</sup>。II 型 LA 的噪声性能对相干光通信系统的性能至关重要, 它直接影响到系统的误码率<sup>[2]</sup>。

我们对 II 型 LA 的强度噪声谱和频率漂移谱, 进行了数值计算, 并讨论了注入光的噪声谱、注入光功率和锁定相位等对噪声谱的影响。

### 二、理 论

在单纵模振荡时, 激光腔内的电场可表示为

$$E(z, t) = \frac{1}{2} [E(t) \exp(-j\omega_0 t) + \text{c. c.}] \sin(kz) \quad (1)$$

$E(t)$  是缓慢变化的复电场振幅,  $\omega_0$  是激励频率,  $k = \eta\omega_0/c$  为模的波数,  $\eta$  是有效折射率,  $c$  为光速。将 (1) 式代入到波方程后得:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \left\{ \frac{1}{2} \left( G - \frac{1}{\tau_p} \right) (1 - jR) + j \frac{\eta}{\eta_0} (\omega_0 - \Omega) \right\} \times E(t) + \frac{K}{2} E_i(t) + F(t) \quad (2)$$

上式中  $G = c\Gamma g/\eta_0$  是受激发射速率,  $\Gamma$  是光模限制因子,  $g$  是电增益,  $\eta_0$  是群折射率,  $\tau_p$  是光子寿命,  $R$  为线宽展宽因子,  $\Omega$  是腔频率,  $K = c/\eta_0 L$ ,  $L$  是 LA 的腔长,  $E_i(t)$  是外部注入光场。为方便计, 这里假设激励频率等于注入光的频率,  $F(t)$  是郎之万噪声源。

如果取  $E(t) = \sqrt{p} \exp(j\varphi_1)$ ,  $E_i(t) = \sqrt{p_i} \exp(j\varphi_2)$ , 则  $p$  和  $p_i$  分别表示 LA 腔中和外部注入的光子数 (对  $E$  和  $E_i$  进行适当的归一化处理后),  $\varphi_1$  和

$\varphi_2$  则分别表示两光场的相位。再取线性增益  $g(n) = \alpha \cdot (n - n_0)$ <sup>[3]</sup>,  $n$  和  $n_0$  分别为载流子密度和零增益载流子密度,  $\alpha$  为增益系数。故在考虑到自发辐射耦合到激励模的影响后, 有

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_p} + G_0(N - N_1)P + K_r P \cos \theta + F_R(t) + G_0N \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = -\frac{\eta}{\eta_0} (\omega_0 - \Omega) + \frac{R}{2} \left[ G_0(N - N_1) + \frac{G_0N}{P} - \frac{1}{\tau_p} \right] + \frac{X_r}{2} \sin \theta + F_I(t) \quad (4)$$

上面  $G_0 = \alpha c\Gamma/\eta_0 V$  是微分增益,  $V$  是有源区体积,  $N = nV$  是有源区载流子数,  $N_1 = n_0V$ ,  $\theta = \varphi_2 - \varphi_1$  为注入光场和 LA 光场的相位差,  $r = (P_i/P)^{1/2}$ 。  $F_R(t) = R_e[F(t)]$ ,  $F_I(t) = I_m[F(t)]$ 。

LA 导带中的载流子数服从下面的规律<sup>[4]</sup>

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_s} - G_0(N - N_1)P - G_0N + F_N(t) \quad (5)$$

$I$  为 LA 的注入电流,  $e$  为电子电荷,  $\tau_s$  为载流子寿命,  $F_N(t)$  是郎之万噪声源。

在一阶近似时<sup>[4]</sup>, 令  $P = \bar{P} + \Delta P(t)$  等,  $\bar{P}$  为光子数的稳态均值, 可由 (3)~(5) 式的稳态平均得到;  $\Delta P(t)$  表示绕均值所做的扰动。这样, (3)~(5) 式就变成了

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{P} \\ \Delta \dot{N} \\ \Delta \dot{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta N \\ \Delta \varphi_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{14} \Delta P_i - a_{13} \Delta \varphi_2 \\ 0 \\ a_{34} \Delta P_i - a_{33} \Delta \varphi_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_R \\ F_N \\ F_I \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中各系数用矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_0(N-N_1) - \frac{1}{\tau_p} + \frac{K_r}{2} \cos \theta & G_0(P+1) \\ -G_0(N-N_1) & -G_0(P+1) - \frac{1}{\tau_s} \\ -\frac{RG_0N}{2P^2} - \frac{K_r}{4P} \sin \theta & \frac{R}{2} \left(1 + \frac{1}{p}\right) \\ P_r K \sin \theta & \frac{K}{2r} \cos \theta \\ 0 & 0 \\ -\frac{rK}{2} \cos \theta & \frac{K}{4P} \sin \theta \end{pmatrix}$$

为方便计,上面表示稳态均值的符号“-”均省略了。

郎之万噪声源  $F_R$  等所满足的稳态扩散系数  $2D_{RR}$  等服从  $\langle F_R(t)F_R^*(s) \rangle = \delta(t-s) \cdot 2D_{RR}$ , 它们可类似于[5]给出。

对(6)式做傅里叶变换,即令  $F(\Delta P) = \delta P(\omega)$  等,就可得到 LA 的相对强度噪声谱为

$$\begin{aligned} S_P(\omega) &= \langle |\delta P(\omega)|^2 \rangle / P^2 \\ &= \Delta^{-1} P^{-2} [2D_{RR}(I_1^2 + I_2^2) + 2D_{NN}(I_3^2 + I_4^2) \\ &\quad + 2D_{II}(I_5^2 + I_6^2) - 4D_{RN}(I_1 I_3 + I_2 I_4)] \\ &\quad + \Delta^{-1} P^{-2} [(a_{14} I_1 - a_{34} I_5)^2 + (a_{14} I_2 \\ &\quad - a_{34} I_6)^2] S_{P_i}(\omega) + \Delta^{-1} P^{-2} [I_5^2 \\ &\quad + I_6^2] S_{\phi_2}(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $S_{P_i}$  和  $S_{\phi_2}$  分别表示注入光的强度噪声谱和频率飘移谱,  $I_1 = a_{22} a_{33} - \omega^2$ ,  $I_2 = \omega(a_{22} + a_{33})$ ,  $I_3 = a_{12} a_{33} - a_{32} a_{13}$ ,  $I_4 = \omega a_{12}$ ,  $I_5 = a_{13} a_{22}$ ,  $I_6 = \omega a_{13}$ ,  $\Delta = [\omega^2(a_{11} + a_{22} + a_{33}) + a_{12} a_{21} a_{33} + a_{31} a_{13} a_{22} - a_{11} a_{22} a_{33}]^2 + \omega^2[a_{22} a_{33} + a_{11} a_{22} + a_{11} a_{33} - a_{12} a_{21} - a_{13} a_{31} - \omega^2]^2$ 。同理可得频率飘移谱为

$$\begin{aligned} S_{\phi_1}(\omega) &= \omega^2 \langle |S_{\phi_1}(\omega)|^2 \rangle \\ &= \Delta^{-1} \omega^2 [2D_{RR}(L_1^2 + L_2^2) + 2D_{NN}(L_3^2 + L_4^2) \\ &\quad + 2D_{II}(L_5^2 + L_6^2) - 4D_{RN}(L_1 L_3 \\ &\quad + L_2 L_4)] + \Delta^{-1} \omega^2 [(a_{14} L_1 + a_{34} L_5)^2 \\ &\quad + (a_{14} L_2 + a_{34} L_6)^2] S_{P_i}(\omega) \\ &\quad + \Delta^{-1} [(a_{13} L_3 + a_{33} L_5)^2 + (a_{13} L_2 \\ &\quad + a_{33} L_6)^2] S_{\phi_2}(\omega) \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $L_1 = a_{21} a_{32} - a_{31} a_{22}$ ,  $L_2 = \omega a_{31}$ ,  $L_3 = a_{11} a_{32} - a_{12} a_{31}$ ,  $L_4 = \omega a_{34}$ ,  $L_5 = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21} - \omega^2$ ,  $L_6 = \omega(a_{11} + a_{22})$ 。

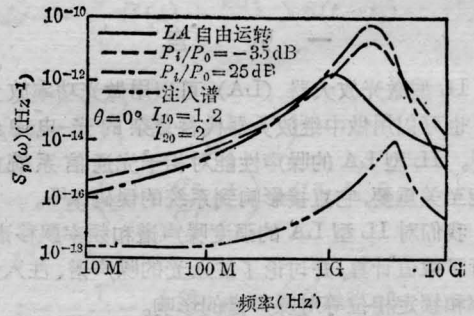
### 三、讨论

上节虽然给出了噪声谱,但较复杂,必须进行数

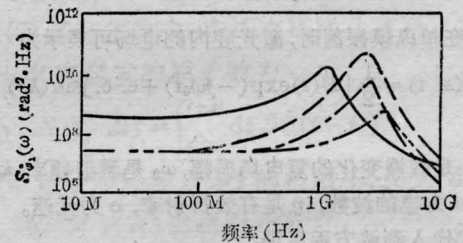
值分析。数值计算所取参数值如下<sup>[3]</sup>:  $L=200 \mu\text{m}$ , 有源区横截面积为  $1 \mu\text{m}^2$ ,  $\tau_s=3 \text{ns}$ ,  $R=5$ ,  $\eta=3.5$ ,  $\eta_0=4$ ,  $G_0=2.3 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ ,  $N_1=2 \times 10^3$ ,  $\tau_p=1.6 \text{ps}$ , 波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ , 并设注入激光器与 LA 具有相同的参数, LA 自由运转(未注入)时的稳态平均光子数是  $P_0$ 。

图 1 给出了注入光功率改变时,注入噪声谱、LA 自由运转的噪声谱和 IL 型 LA 噪声谱的比较。由图 1 可看出,在低频时,无论是 LA 的强度噪声(用相对强度噪声谱来表征)还是相位噪声(由频率飘移谱来表征)都低于 LA 自由运转时的噪声;注入进 LA 的光功率越高,LA 的噪声特性越好,这与注入光功率越高,锁定带宽越宽的结果是一致的<sup>[5]</sup>。

图 2 给出了不同锁定相位情况下的频率飘移



(a) 相对强度噪声谱的比较



(b) 频率飘移谱的比较

图 1

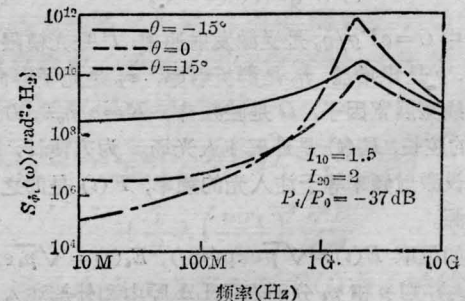


图 2 锁定相位的影响

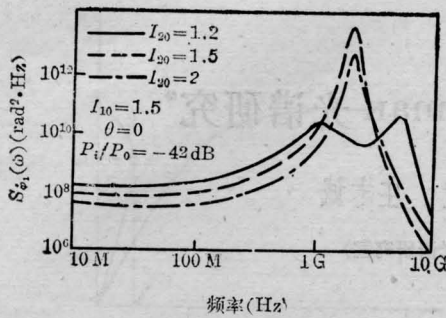


图3 注入光噪声的影响

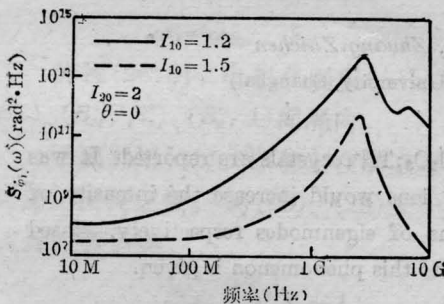


图4 LA注入电流的影响

谱。由图2可看到,噪声谱关于锁定相位是不对称的,且最低的噪声并非出现在 $\theta=0$ 时。这时由于载流子变化引起折射率变化的结果<sup>[5,6]</sup>。若 $R=0$ ,则 $\theta=0$ 时噪声特性最好。由图2还可看到锁定相位的较小改变,将会导致噪声谱形状和强度的较大改变,

这在实际应用中应格外注意。

图3给出了在注入光噪声谱随 $I_{20}$ 改变时LA频率漂移谱的变化。在注入功率固定、LA注入电流不变时,如果注入光的噪声特性好( $I_{20}$ 增大意味着注入光的噪声特性变好),则LA的噪声特性好。因此,应该尽可能地降低注入光的噪声。

在图4中给出了当注入光功率固定, $\theta=0$ , $I_{20}=2$ , $I_{10}$ 取值不同(即自由运转时LA的噪声特性改变)时的频率漂移谱。LA的注入电流越大就意味着它自由运转时的噪声越小,这时LA的噪声特性越好。然而,当注入光功率不变时,增大LA的注入电流意味着锁定带宽变小<sup>[5]</sup>。因此,在实际应用中,应该综合考虑,寻求适当的折衷。

### 参 考 文 献

- 1 Simon J C. *Opt. Commun.*, 1983; 4(2): 51
- 2 杨恩泽等. 光纤数字通信接收机, 北京: 人民邮电出版社, 1984: 164
- 3 Agrawal G P. *J. Appl. Phys.*, 1984; 56(11): 3110
- 4 Agrawal G P. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984; QE-29(5): 468
- 5 Mogensen F et al. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1985; QE-21(7): 784
- 6 Hehry C H. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982; QE-18(2): 259

(收稿日期: 1986年9月30日)

## 激光热敏电阻微调机通过鉴定

上海光机所与新疆物理所联合试制的LTT-1型激光热敏电阻微调机,是一种精密调整热敏元件阻值的新工艺设备,于1987年9月23日至25日在新疆乌鲁木齐市通过了上海分院及新疆分院联合组织的鉴定。

鉴定会测试组对装置性能进行了实测,八个单位近二十名代表观看了装置对热敏电阻微调的操作

表演。

与会代表一致认为该装置解决了热敏电阻阻值微调的关键技术。通过新疆物理所、航天部804所等单位对该机的使用,证明该装置具有调整精密高、操作方便、稳定可靠等优点,提高了电阻元件的互换性。代表们希望进一步提高调阻速度,使装置早日开发成实用产品。(木旦)

## 川、贵、云、辽四省医用激光学术交流会在大连召开

四川、贵州、云南、辽宁四省联合医用激光学术交流会在大连召开,于1987年10月6日至10日在大连市召开,近80名来自上述四省及北京、上海、长春、深圳等地的代表参加了会议。大会共收到论文80多篇,有26篇在大会上作了交流,内容涉及CO<sub>2</sub>、YAG、Ar<sup>+</sup>、He-Ne等类激光器在外科、皮肤科、五官科、妇科、小儿科以及肿瘤医治等方面的近期应用情况。会议

期间,代表们对激光-血卟啉治疗恶性肿瘤的日臻完善以及用YAG激光治疗食道癌的良好疗效颇感兴趣,对激光医疗体制以及医务人员的激光防护等问题提出了建设性的意见。

会议初步决定下届会议于1989年在四川成都召开,范围将进一步扩大,将成为东北和西南地区的联合激光医用学术交流会。(吉禾)