

用速率方程分析垂直腔面发射激光器的噪声

张 益 黄永箴 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(1997 年 5 月 21 日收到; 1997 年 7 月 15 日收到修改稿)

采用一种合理的噪声模拟方法, 用速率方程对垂直腔面发射激光器的噪声特性进行了数值分析, 在单模情况下计算了器件的自发辐射因子、输出功率、注入电流、阈值电流等参数与相对强度噪声、频率噪声以及线宽等特性的关系, 计算结果与实验基本相符, 对优化垂直腔面发射激光器的结构设计和应用条件有所裨益.

PACC: 4255P; 4260

1 引 言

垂直腔面发射激光器(简称 VCSEL)具有许多优点, 如阈值电流低、单纵模工作、易于实现列阵及光电集成等, 在光信息处理和光互连等领域有着广阔的应用前景, 近年来的研究进展相当迅速, 在光互连方面已走向实用阶段^[1,2]. VCSEL 的主要应用之一是作为高速数据传输的光信号源, 故对噪声特性有较高要求, 如相对强度噪声(RIN)低、调制带宽高、谱线宽度窄等. 为了优化 VCSEL 的结构, 获得优良的器件性能, 有必要对 VCSEL 的器件参数与噪声特性的关系进行理论分析.

求解含噪声项的速率方程是半导体激光器的噪声数值分析的基本方法, 其中噪声项一般取 Langevin 噪声源, 即具有某一期望值的高斯随机过程^[3]. 有多人用这种方法对微腔激光器和 VCSEL 的噪声特性进行了分析, 由于方程中各项的取舍不同, 结果也不尽相同^[4-7]. 不过取这种噪声源要求激光器内光子数很大, 当光子数较少时, 其涨落不再呈高斯分布, 该噪声源就不适用. 由于 VCSEL 的微腔结构, 工作时光腔内的光子数较少, 特别是在阈值电流极低的情况下. 因此需要采用更合适的形式来模拟分析 VCSEL 的噪声特性.

本文采用了一种对 VCSEL 更合理的噪声产生方法^[8], 通过求解速率方程, 在单模情况下对 VCSEL 的自发辐射因子 γ 、输出功率 P 、注入电流 I 、阈值电流 I_{th} 等参数对器件相对强度噪声 RIN、频率噪声以及线宽等噪声特性的影响进行了模拟数值分析, 计算了它们之间的各种关系, 并对计算结果进行了详细分析.

2 计算方法

2.1 噪声表示

激光器内的归一化光场强度可表示为 $E(t) = \sqrt{S(t)} \exp[j\phi(t)]$, $S(t)$ 为光子数,

$\phi(t)$ 为幅度缓变量的相位, 其噪声也分为强度噪声和相位噪声.

如果激光器的输出功率表示为 $P(t) = \langle P \rangle + \delta P(t)$, 其中 $\langle P \rangle$ 为平均功率, 则 $\delta P(t)$ 代表强度噪声, 该噪声可在时域表示为

$$\rho_P(\tau) = \langle \delta P(t) \delta P(t - \tau) \rangle, \quad (1)$$

也可在频域表示为

$$\begin{aligned} W_P(\omega_m) &= \langle |\Delta P(\omega_m)|^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_P(\tau) \exp(-j\omega_m \tau) d\tau \\ &= \lim_{t' \rightarrow \infty} \frac{1}{t'} \left| \int_0^{t'} \delta P(t) \exp(-j\omega_m t) dt \right|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

如果噪声经过中心频率为 ω_m 、带宽为 Δf 的窄带滤波器, 则噪声平均值为

$$\langle \delta P^2 |_{\Delta f} \rangle = 2\Delta f \langle |\Delta P(\omega_m)|^2 \rangle = 2\Delta f W_P(\omega_m). \quad (3)$$

通常是用相对强度噪声 RIN 来表示强度噪声,

$$\text{RIN} = \frac{\langle \delta P^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{2\Delta f \langle |\Delta P(\omega_m)|^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{2\Delta f W_P(\omega_m)}{\langle P \rangle^2}. \quad (4)$$

用瞬态频率 $\dot{\phi}$ 来考虑相位噪声比较方便, 即 $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \langle \dot{\phi} \rangle + \delta \dot{\phi}$. 频率噪声 $\delta \dot{\phi}$ 也可在时域和频域分别表示为

$$\dot{\phi}_\phi(\tau) = \langle \delta \dot{\phi}(t) \delta \dot{\phi}(t - \tau) \rangle, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W_{\dot{\phi}}(\omega_m) &= \langle |\Delta \dot{\phi}(\omega_m)|^2 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{\phi}_\phi(\tau) \exp(-j\omega_m \tau) d\tau \\ &= \lim_{t' \rightarrow \infty} \frac{1}{t'} \left| \int_0^{t'} \delta \dot{\phi}(t) \exp(-j\omega_m t) dt \right|^2. \end{aligned} \quad (6)$$

另外, 还可得到激光器的谱线宽度^[3]

$$\Delta \nu = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = \frac{W_{\dot{\phi}}|_{\omega_m \rightarrow 0}}{2\pi}. \quad (7)$$

2.2 速率方程与噪声产生方法

带噪声项的半导体激光器速率方程如下^[3]:

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma v_g g S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \frac{\gamma N}{\tau_{sp}} + f_s(t), \quad (8)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_{sp}} - \Gamma v_g g S + f_n(t), \quad (9)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \alpha v_g \frac{\partial g}{\partial n} (n - n_{th}) + f_\phi(t), \quad (10)$$

其中 S , N 分别表示光腔中的光子总数和有源区中的载流子总数, ϕ 为光场相位, $f_i(t)$ 为各项的噪声源, n 为载流子密度, γ 为自发辐射因子, Γ 为光限制因子, g 为有源区增益, v_g 为光群速, τ_{ph} 为光子寿命, τ_{sp} 为载流子寿命, α 为线宽增强因子, I 为注入电流.

由于本文重点在于产生噪声项的方法,所以此处只考虑单模情况和线性增益,即取 $g = a_0(n - n_e)$. 另外一般载流子数的涨落影响相对较小,故也可忽略 $f_n(t)$ 项.

半导体激光器的噪声主要是由自发辐射光子引起的. 一个自发辐射光子耦合进激发模式中,与光场的相位差 θ 在 0 到 2π 之间均匀随机分布,该光子与原光场进行矢量叠加,可使光子数变化 $\Delta S = 1 + 2\sqrt{S} \cos \theta$, 相位变化 $\Delta \phi = \arctan(\sin \theta / (\sqrt{S} + \cos \theta))$, 从而引起噪声. 这种噪声模拟方法不受光子数的限制,也无需作近似,对分析 VCSEL 或微腔激光器比较合理,本文即采用这种方法.

取 Δt 内进入模式的自发辐射光子数以期望值 $S' = \gamma N \Delta t / \tau_{sp}$ 呈泊松随机分布,于是有

$$f_s(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\sum_{i \in \Delta t} \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i \in \Delta t} \sin \theta_i \right)^2 + 2\sqrt{S} \sum_{i \in \Delta t} \cos \theta_i \right], \quad (11)$$

$$f_\phi(t) = \frac{1}{\Delta t} \arctan \left[\sum_{i \in \Delta t} \sin \theta_i / \left(\sqrt{S} + \sum_{i \in \Delta t} \cos \theta_i \right) \right]. \quad (12)$$

(8) 式中的自发辐射项已包含在 (11) 式中,故计算时不再加入. 把 (11), (12) 式代入速率方程中,用 Runge-Kutta 法求解,再对结果进行傅里叶分析,即可得到噪声的各种频谱特性.

3 计算结果与分析

典型 InGaAs 量子阱 VCSEL 的主要结构和材料参数为: $\lambda = 980 \text{ nm}$, 有源区厚度 $d = 24 \text{ nm}$, $\Gamma = 0.1$, $v_g = 8.8 \times 10^9 \text{ cm/s}$, $\alpha = 4$, $\tau_{sp} = 2 \text{ ns}$, $a_0 = 3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $n_e = 1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 端面反射率为 $R_1 = R_2 = 0.995$, 内部损耗 $\alpha_{in} = 30 \text{ cm}^{-1}$, 等效腔长 $L = 1.2 \mu\text{m}$. 因为 VCSEL 的光腔体积很小,对 γ 有较大影响,所以 γ 和光腔体积即横向尺寸取近似反比关系^[9].

另外,计算总时间 $T = 25 \text{ ns}$, Δt 的取值使 S' 为 $1 \sim 2$, 一般 $\Delta t = 2.5 \text{ ps}$.

3.1 γ 与噪声的关系

图 1 至图 3 是输出功率 $P = 1 \text{ mW}$ 时不同 γ 的噪声特性. 由于各 γ 值的阈值电流 I_{th} 不同,所以同时也注明了注入电流 I 与 I_{th} 的关系.

图 1 是 $P = 1 \text{ mW}$, $\gamma = 0.05$ 时归一化光子数随时间的变化曲线,即输出光的瞬态特性,该图反映了噪声在时域的情况. 图 2 是不同 γ 的归一化光子数的统计分布情况,为清楚起见, $\gamma = 0.01$ 和 0.05 的曲线纵坐标按比例缩小,其实际值应分别乘以 2 和 4. 因为输出功率较大,激光器内的光子数很多,所以光子数分布大致都呈高斯分布,但 γ 越小分布半宽越大,说明光子数涨落和绝对强度噪声也越大,这在图 3 的相对强度噪声 RIN 中也有所反映.

图 3 是 $P = 1 \text{ mW}$ 时,不同 γ 的 RIN 和频率噪声频谱曲线. 为了进行比较, P 的取值须使不同 γ 都满足注入电流 I 大于其 I_{th} , 而 γ 越大,光腔和有源区体积就越小, I_{th} 也越小,所以 $P = 1 \text{ mW}$ 时,对 $\gamma = 0.01$ 和 0.05 , I/I_{th} 已很大. 虽然实际上器件很难工作在这

种条件下,但通过该计算结果仍可在相似情况下正确判断 γ 对器件噪声特性的影响.

由图 3 可知,在相同功率条件下 γ 增大, RIN 略有减小.但各种 γ 的 RIN 在小于 1 GHz 时都降至 10^{-14} Hz^{-1} ,这是因为此时激光器都工作在远高于 I_{th} 的条件下,其强度噪声已接近于量子限制噪声.另外,随着 γ 的增大,弛豫共振峰向高频方向移动,且峰值下降,对 $\gamma=0.05$,该峰基本消失,说明 γ 增大使输出光的弛豫振荡减弱.以上结果表明, γ 较大对器件高速调制性能较为有利,但要求激光器工作在 $I \gg I_{th}$ 的情况下,这对器件寿命和工作稳定性都有影响.

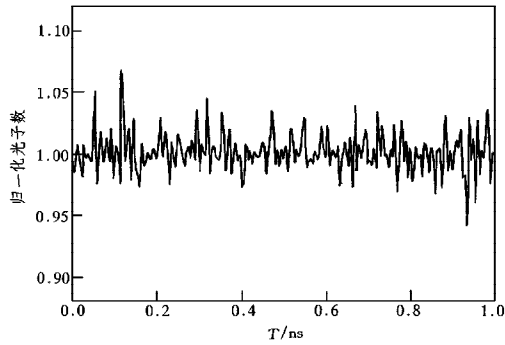


图 1 归一化光子数随时间的变化关系 $P=1 \text{ mW}$, $\gamma=0.05$

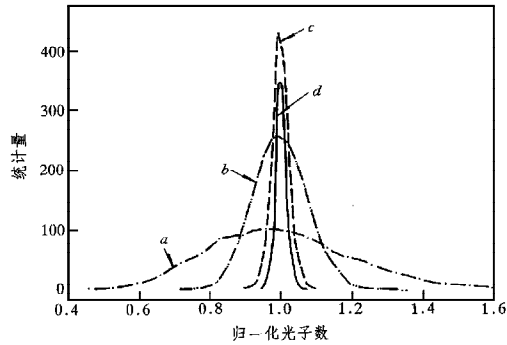


图 2 不同 γ 的光子数统计分布 曲线 a, b, c, d 分别对应 $\gamma=0.0001, 0.001, 0.01(\times 2), 0.05(\times 4)$

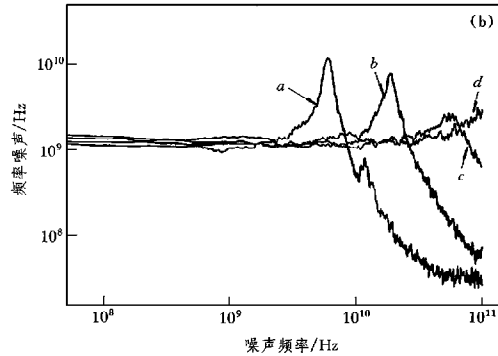
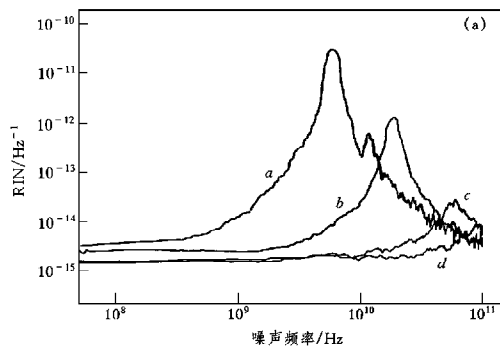


图 3 $P=1 \text{ mW}$ 时不同 γ 的 RIN (a)和频率噪声(b)频谱曲线 曲线 a, b, c, d 分别对应 $\gamma=0.0001, I/I_{th}=3; \gamma=0.001, I/I_{th}=20; \gamma=0.01, I/I_{th}=50; \gamma=0.05, I/I_{th}=100$

因为 RIN 和频率噪声是部分相干的,所以对频率噪声频谱情况相似.低频部分的频率噪声值与线宽有关(见(7)式),由于上述原因,此时不同 γ 的线宽相近,约在 10^8 数量级,而 γ 较大时高频的频率噪声却下降缓慢.

3.2 P 与噪声的关系

图 4 至图 6 是 γ 一定时不同输出功率 P (或注入电流 I)的噪声特性,同时也注明了 I

与 I_{th} 的关系.

图 4 是 $\gamma=0.01$ 时不同 P 的归一化光子数的统计分布情况. 可见, 当 P 较小时光子数不再呈高斯分布, 而近似为泊松分布, 且平均值减小, 说明此时光子数已较少, 其为零的概率增大. 这固然与噪声项的产生方法有关, 但也与实际情况符合.

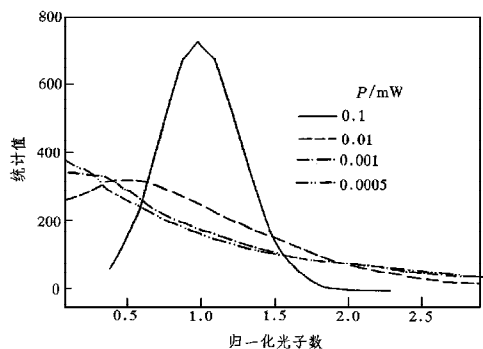


图 4 $\gamma=0.01$ 时不同 P 的光子数统计分布

声类似于发光管, 故没有共振峰, 而频谱的下降沿则反映了器件本身的带宽特性.

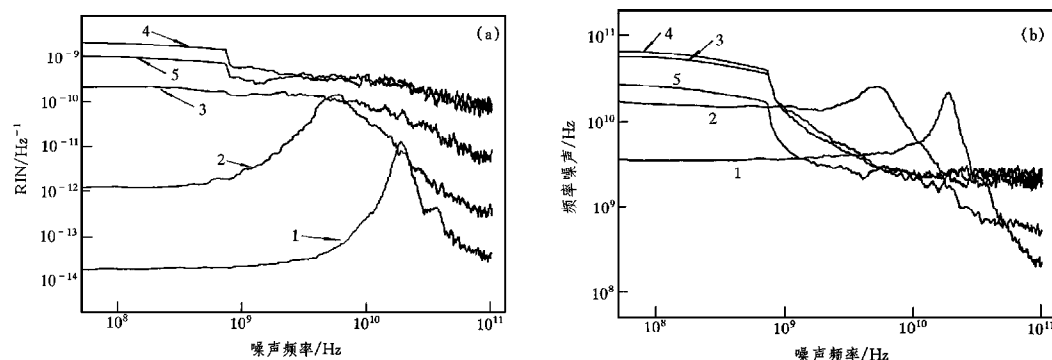


图 5 $\gamma=0.01$ 时不同 P 的 RIN(a) 和频率噪声(b) 频谱曲线 曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应 $P=0.1$ mW, $I/I_{th}=20$; $P=0.01$ mW, $I/I_{th}=3$; $P=0.001$ mW, $I/I_{th}=1.2$; $P=0.0004$ mW, $I/I_{th}=1.0$; $P=0.0001$ mW, $I/I_{th}=0.85$

实验表明, 对 I 而言, 半导体激光器的 RIN 在 I_{th} 附近有峰值^[9], 计算结果与此符合. 但对 $\gamma=0.01$ 和 0.0001 也有所不同, $\gamma=0.05$ 的 RIN、频率噪声以及线宽在 I_{th} 附近变化都小于 $\gamma=0.0001$ 的情况. 这可能是由于 γ 较大, 注入电流在 I_{th} 附近时激光器内光子数都很少, 其为零的概率较大, 导致噪声情况变化不大, 而当 I 几倍于 I_{th} 时噪声就明显降低. VCSEL 或微腔激光器的 γ 都大于普通半导体激光器, 最大可达 10^{-2} 数量级^[12], 所以 γ 较大者更有参考价值. 这说明即使 I_{th} 极低, VCSEL 也不能工作在低注入电流条件下, 只有工作在较大输出功率条件下器件噪声才能有效得到控制.

另外, 从频率噪声谱可看出, 线宽在 I_{th} 附近也有峰值, 在小于 I_{th} 时降低明显, 这与文献[5, 6]的计算结果(线宽在小于 I_{th} 时趋于恒定或略有下降)不同. 本文在处理相位噪声时未作近似, 方法比较合理, 结果是否可靠还有待证实.

综上所述, 在 VCSEL 的设计和应用中, 通过减小横向光限制面积即光腔体积等方

法,可增大 γ ,降低器件的 I_{th} ,但仍需工作在较大注入电流条件下,保证一定的输出功率,才能使器件噪声较低,以满足高速数据传输的需要.因此,在器件设计时不能只单方面考虑降低 I_{th} ,同时应考虑到输出功率的要求,以获得最佳的器件应用性能.

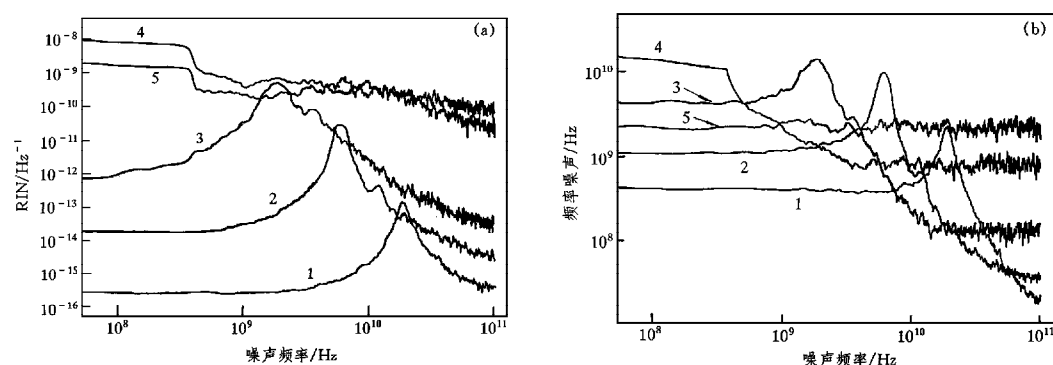


图6 $\gamma=0.0001$ 时不同 P 的 RIN(a)和频率噪声(b)频谱曲线. 曲线 1,2,3,4,5 分别对应 $P=10\text{ mW}$, $I/I_{th}=20$; $P=1\text{ mW}$, $I/I_{th}=3$; $P=0.1\text{ mW}$, $I/I_{th}=1.2$; $P=0.004\text{ mW}$, $I/I_{th}=1.0$; $P=0.0002\text{ mW}$, $I/I_{th}=0.85$

4 结 论

本文以速率方程为基础,由自发辐射光子耦合引起模式光子数及相位涨落而模拟噪声产生,在单模情况下对 VCSEL 的自发辐射因子 γ 、输出功率 P 、注入电流 I 、阈值电流 I_{th} 等参数对器件的相对强度噪声、频率噪声以及线宽等特性的影响进行了数值分析.结果表明 γ 和 P (或 I) 较大可使器件噪声降低,但两者是矛盾的,尽管增大 γ ,可降低 I_{th} ,但必须工作在一定功率条件下才有利于高速调制,在小注入电流时其噪声特性并不理想.所以 VCSEL 的设计应综合考虑降低 I_{th} 和提高输出功率的要求,以获得最佳的器件性能和应用条件.

- [1] Yiu-Man Wong *et al.*, *J. Lightwave Technology*, **13**(1995), 995.
- [2] Hideo Kosaka *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**(1997), 244.
- [3] K. Peterman, *Laser Diode Modulation and Noise* (Kluwer Academic Publishers, 1991), ch. 7.
- [4] G. P. Agrawal, George R. Gray, *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 399.
- [5] Gunnar Bjork *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **60**(1992), 304.
- [6] Minoru Yamada, *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**(1994), 1511.
- [7] Joanne Y. Law, Govind P. Agrawal, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**(1997), 437.
- [8] 郭长志、黄永箴, *物理学报*, **39**(1990), 1075.
- [9] Fumio Koyama *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**(1991), 1410.
- [10] D. M. Kuchta *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **62**(1993), 1194.
- [11] B. Moller *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**(1994), 921.
- [12] D. V. Kuksenkov *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **70**(1997), 13.

ANALYSIS OF THE NOISE IN VCSEL USING RATE EQUATION

ZHANG YI HUANG YONG-ZHEN WU RONG-HAN

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083*)

(Received 21 May 1997; revised manuscript received 15 July 1997)

ABSTRACT

The noise characteristics of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) are analysed by using rate equations with a reasonable noise simulating method, and the effect of device parameters (such as spontaneous emission factor, output power, injection current and threshold current) on relative intensity noise, frequency noise and spectral linewidth is calculated under single-mode condition. The results are in agreement with experiments. These results may be helpful for optimising the structure design and determining the factors in the application of VCSEL.

PACC: 4255P; 4260