

激光二极管动态调制分析模型及其应用

陈维友 刘式墉

(吉林大学电子科学系, 长春, 130023)

1990年7月13日收到, 1991年1月17日修改定稿

本文给出一个新的适于电路分析的激光二极管(LD) 动态调制分析模型。讨论了增益压缩因子及调制电流幅度对 LD 开关时间及弛张振荡的影响。发现对于给定的 ϵ , 有一最佳调制电流幅度, 使得 LD 开关时间最小, 弛张振荡幅度很小。对一含有缓冲放大级的光电集成光发射机的开关特性进行了计算机辅助分析, 讨论了调制信号幅度及 LD, 驱动电路的开关特性对 OEIC 开关性能的影响。

一、引言

为能借助现有的电路模拟软件, 如 SPICE 2 及其各种版本, 对 LD 及 OEIC 进行计算机辅助分析(CAA), 许多人在 LD 模型开发上做了大量的工作, 开发出多种实用的 LD 模型, 诸如本征 LD 模型^[1], 阈值以下的 LD 模型^[2], 小信号 LD 模型^[3,4], 改进的 LD 小信号模型^[5], 大信号 LD 模型^[6]。这些模型的开发, 使得用现有的电路模拟软件对 LD 或 OEIC 的频域, 时域分析成为可能。但是, 在做这样的分析时, 确定 LD 等效电路中各等效元件的值是非常麻烦的, 而且也不够精确。随着 OEIC 的发展, 开发 OEIC 专门分析软件或将 LD 模型引入已具备 MESFET 模型的电路模拟器(如 SPICE3A7, UM-SPICE) 将是必然的趋势。Tucker 等人给出的 LD 小信号模型^[3,4]具有等效电路简单, 物理意义直观等特点, 可以在开发 OEIC 分析软件中使用, 但 Tucker 的大信号模型^[6], 其等效电路是非常复杂的, 不易于直接采用。本文以考虑了载流子横向扩散及非线性效应的 LD 单模速率方程^[7]为基础, 采用电路分析中处理储能元件的瞬态伴随模型法^[8], 导出一个简单的 LD 动态调制分析模型。为开发 OEIC 专门分析软件奠定了基础。

为适应 OEIC 发展的需要, 我们开发了 OEIC 通用模拟程序, 现已在 DPS 8 机上调试成功。在该程序的开发过程中, 我们力求给出比较完备的 MESFET, LD 模型。可用于模拟分析的 MESFET 模型很多, 该程序选择了有代表性的三个, I, 类似于 JFET 模型^[9]; II, 平方律模型^[10] (UM-SPICE 采用了此模型); III, 完全速度饱和模型^[11]。模型 I 有四个参数需经过曲线拟合方法得到, 这给使用者带来一定的麻烦, 但其适用范围较广, 模型 II, III 的模型参数直接与器件的几何参数及材料参数相联系, 对分析器件的几何参数及材料参数的影响是很方便的, 但它们都有一定的适用范围, 前者适于低阈值电压情况, 即 $V_{p0} < 3V_s L_g / U$, V_{p0} 为夹断电压, V_s 为电子饱和速度, U 为低场迁移率, L_g 为栅长, 后者适于 $V_{p0} > 3V_s L_g / U$ 情况。该程序中, LD 有两个模型, 频域分析时采用 Tucker 小信号模型, 时域分析时采用我们自己开发的 LD 动态调制分析模型, 下面将作

详细介绍。

二、LD 动态调制分析模型

在 LD 调制响应中, 阻尼弛张振荡现象是总能观察到的, 产生响应阻尼的因素很多, 如载流子横向扩散^[12], 自发发射因子^[13], 光谱烧孔^[14], 非线性吸收^[15]等。把载流子扩散及其它非线性效应用统一的场依赖光增益压缩因子来模拟, 并把它引入 LD 的单模速率方程^[4, 7, 16, 17], 有

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_i}{\alpha} - \frac{N}{\tau_n} - G(1 - \varepsilon S)S \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \left[G(1 - \varepsilon S) - \frac{1}{\tau_p} \right] S + \beta \frac{N}{\tau_n} \quad (2)$$

式中, N 是电子密度, S 为光子密度, τ_p , τ_n 分别为光子寿命和电子寿命, β 为自发发射因子, $\alpha = qV_{act}$, V_{act} 为有源区体积, $G = \Gamma g_0(N - N_{0g})$, Γ 为光限制因子, g_0 为光增益常数, N_{0g} 为零增益时的电子密度, I_i 为注入有源区的电流, ε 为光增益压缩因子。

这里仍采用经典的肖克来关系来近似异质结 $N - V_i$ 特性^[18]

$$N = N_e [\exp(\lambda V_i) - 1] \quad (3)$$

式中, N_e 为平衡电子密度, $\lambda = q/\eta kT$, 对于 GaAlAs 器件, $\eta=2$ 。

把(3)式代入(1)式, 整理后得到

$$I_i = C_d \frac{dV_i}{dt} + I_d + I_{i3} \quad (4)$$

其中, C_d 为扩散电容,

$$C_d = \alpha \lambda N_e \cdot \exp(\lambda V_i)$$

$$I_d = \frac{\alpha N_e}{\tau_n} [\exp(\lambda V_i) - 1]$$

$$I_{i3} = \alpha G(1 - \varepsilon S)S$$

从(4)式明显看出, 流过 LD 的电流分成三部分, 流过扩散电容的电流, 流过饱和电流为 $\alpha N_e / \tau_n$ 的等效二极管的电流和受激发射对电流的贡献。第三项还须进一步整理。

令 h_m 为瞬态分析时第 m 步的时间步长, 采用梯型法, 从(2)式可以得到对应当前求解时间点的光子密度值。

$$S^m = \{B^m + [(B^m)^2 + 4G^m \varepsilon C^m]^{\frac{1}{2}}\} / 2\varepsilon G^m \quad (5)$$

其中

$$B^m = G^m - \frac{2}{h_m} - \frac{1}{\tau_p}$$

$$C^m = \frac{2}{h_m} S^{m-1} + \left[G^{m-1}(1 - \varepsilon S^{m-1}) - \frac{1}{\tau_p} \right] S^{m-1} + \frac{\beta}{\tau_n} (N^{m-1} + N^m)$$

(5)式代入(4)式中的第三项, 得到

$$I_{i3}^m = \alpha G^m (1 - \varepsilon S^m) S^m \quad (6)$$

对(6)式采用牛顿-拉夫森迭代进行线性化, 对应第 m 步第 k 次迭代, 有

$$I_{\beta}^{m,k} = G_e \cdot V_i^{m,k} + I_e \quad (7)$$

这里, G_e 为等效电导, I_e 为等效电流, 并且

$$G_e = \alpha \lambda \Gamma g_0 N_0^{m,k-1} (1 - \varepsilon S^{m,k-1}) S^{m,k-1} + \alpha G^{m,k-1} A (1 - 2\varepsilon S^{m,k-1})$$

$$I_e = I_{\beta}^{m,k-1} - G_e V_i^{m,k-1}$$

$$N_0^{m,k-1} = N_e \cdot \exp(\lambda V_i^{m,k-1})$$

$$G^{m,k-1} = \Gamma g_0 \{N_e [\exp(\lambda V_i^{m,k-1}) - 1] - N_{0e}\}$$

$$A = \lambda \Gamma g_0 N_0^{m,k-1} \left\{ 1 + \frac{B^{m,k-1} + 2\varepsilon \left(C^{m,k-1} + \frac{\beta}{\Gamma g_0 \tau_s} G^{m,k-1} \right)}{\sqrt{(B^{m,k-1})^2 + 4\varepsilon G^{m,k-1} C^{m,k-1}}} \right\} \\ 2\varepsilon G^{m,k-1} = S^{m,k-1} / G^{m,k-1}$$

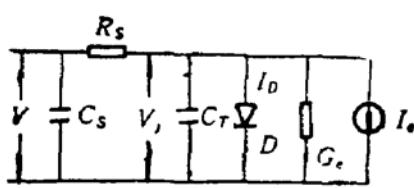


图 1 LD 动态调制模型

$B^{m,k-1}, C^{m,k-1}, S^{m,k-1}$ 取与 B^m, C^m, S^m 相同的表达式, 只是式中相应的量取第 $k-1$ 次迭代时的值。

考虑 LD 串联电阻 R_s , 寄生电容 C_s 及容间电荷电容 $C_{ss} = C_{ss0}(1 - V_i/V_B)^{-\frac{1}{2}}$, V_B 为 LD 的内建势, 由(4),(7)式得到图 1 所示的 LD 动态

调制分析模型, 其中 $C_T = C_e + C_{ss}$. 另外为给 LD 动态分析提供一个精确的初始值, LD 的直流 $I-V$ 特性采用

$$I_i = \frac{\alpha \left(G - \frac{1}{\tau_p} \right) + \sqrt{\left(G - \frac{1}{\tau_p} \right)^2 + 4\varepsilon G \beta \frac{N}{\tau_s}}}{2\varepsilon G} + (1 - \beta) \frac{\alpha N}{\tau_s}$$

上面得到的 LD 模型不能直接给出输出光信息, 而需通过(5)式计算 S^m 得到。

三、模拟分析及讨论

分析所采用的元件为 GaAlAs/GaAsBHLD 和耗尽型离子注入 GaAs-MESFET. LD 的主要模型参数: 串联电阻 10Ω , 寄生电容 1pF , 电子寿命 2ns , 光子寿命 3ps , 自发发射因子 10^{-4} , 阈值电流 20mA , 有源区体积 $4 \times 0.25 \times 300\mu\text{m}^3$, 内建势 1.65V , $\Gamma g_0 = 10^{-12}\text{s}^{-1}\text{m}^3$, $N_{0e} = 5 \times 10^{23}\text{m}^{-3}$, ε 在 10^{-23}m^3 量级^[7]. MESFET 采用平方律模型, 几何参数与[18]相同, 其它参数为, 栅结内建势 0.8V , 有源区掺杂浓度 $1.2 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 电子饱和速度 $1.2 \times 10^3\text{cm/s}$, 低场迁移率为 $4640\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 栅源(栅漏)寄生电容采用[19]给出的模型。

本文涉及到 LD, OEIC 的开关特性, 下面给出开关时间的定义。开关时间包括: 开启延迟时间 t_{d1} , 上升时间 t_r , 关闭延迟时间 t_{d2} , 下降时间 t_f . t_r, t_f 的定义同 [20], 由于本文采用的调制信号为理想的方波脉冲, t_{d1}, t_{d2} 的定义与[20]有所不同, 这里, $t_{d1}(t_{d2})$ 定义为输出光强由关闭值 p_{off} (开启值 p_{on}) 上升(下降)到 $10\% (90\%) p_{on}-p_{off}$ 所需要的时间。

在实际脉冲调制应用中,对应输出光低电平,通常是 LD 完全“关闭”状态,即此时加于 LD 的电流 I_L 低于阈值电流 I_{th} ,同时,为了不严重影响器件的开关性能,应使 I_L 稍低于 I_{th} 。由于前面给出的 LD 动态调制模型仅适于 LD 激射情况,因此这里只能取 I_L 稍高于 I_{th} ,对实际情况进行近似模拟。近似程度取决于模拟用 I_L 与实际的 I_L 之差,差值越小,近似精度越高,这种近似反映在开关时间上是计算的开关时间要比实际测量的开关时间短。如果实际情况不需要 LD 完全“关闭”,则就不存在这种近似了。在本文的各种模拟分析中,LD 一律偏置在 22mA(稍高于阈值),加于 LD 的脉冲信号的低电平为 0mA。

1. 对单个 LD 的模拟分析

这里分析了增益压缩因子 ϵ 和调制信号幅度对 LD 开关时间及弛张振荡的影响,模拟结果见图 2, 3, 4。

图 2 给出了不同 ϵ LD 的调制响应,图中虚线为调制电流波形,调制幅度为 35mA。图中可见,随 ϵ 增大,LD 开关时间增大,弛张振荡幅度减小,当 ϵ 大于 $5 \times 10^{-23} \sim 8 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ 之间某一值时,弛张振荡现象完全消失。应说明一点,为了比较方便,图中所有曲线都绘成等高的。实际上,每条曲线峰值所对应的光强是不同的。以下涉及到调制波形的图都以同样的原则绘制,不再作特别说明。

图 3 给出 $\epsilon = 6.7 \times 10^{-23} \text{ m}^3$, LD 调制响应(a)及开关时间(b)与调制电流的关系。图中可见,随调制电流幅度 I_m 增大,弛张振荡幅度减小,并逐渐消失,阻尼振荡情况转化为完全阻尼情况。 t_{d1}, t_{d2} 随 I_m 增大缓慢减小, $I_m > 40 \text{ mA}$ 时,二者基本上为一恒定值。 $I_m < 35 \text{ mA}$ 时, t_f, t_r 随 I_m 增大逐渐减小,当 $I_m > 40 \text{ mA}$ 时, t_f 缓慢上升, t_r 则上升得很快,并不像文献 [21] 给出的 LD 开关时间的简单表达式所预言的那样随调制电流增大,LD 开关时间单调减小,而是有一个最佳调制电流,使得 LD 开关时间最小,相对弛

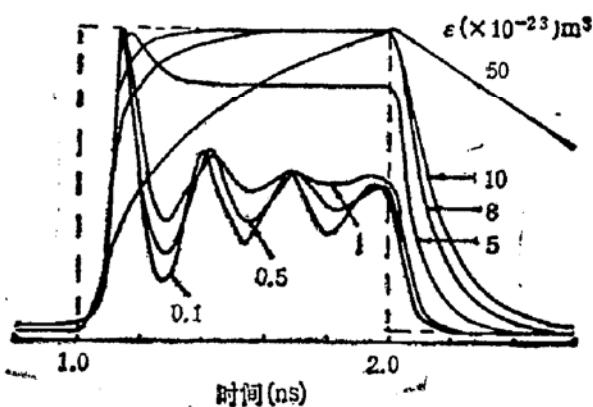
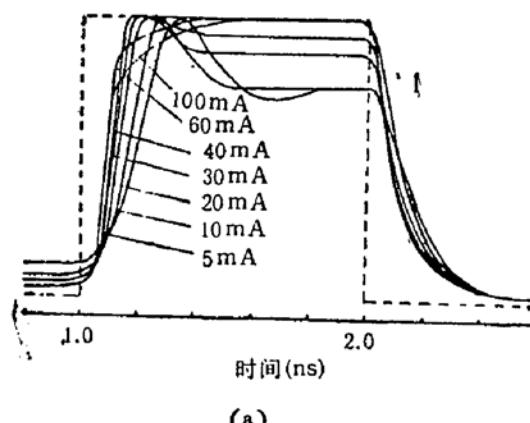


图 2 不同 ϵ 时 LD 的调制响应,调制电流 35mA,
 ϵ 的单位: m^3



(a)

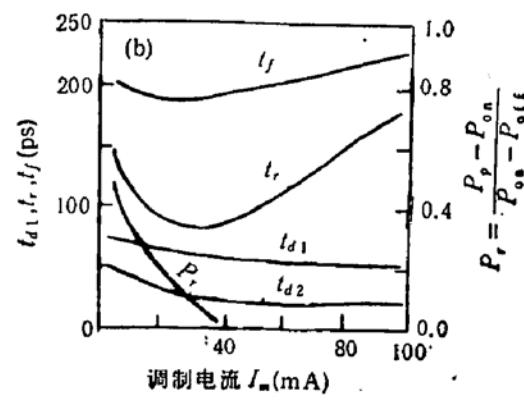


图 3 (a) 不同调制电流下 LD 调制响应

(b) LD 开关时间及相对弛张振荡峰与调制电流的关系

张振荡幅度很小。这种极值现象的产生是由场依赖光增益压缩因子引起的， ϵ 是多种非线性效应的等效，究竟是哪种效应起主要作用须针对具体 LD 结构做具体分析。在数学上可用等效光增益 $G_{\text{eff}} = G(1 - \epsilon S)$ 来解释这种现象，当 $\epsilon S \ll 1$ ， $G_{\text{eff}} \approx G$ ，此时开关时间随调制电流增大而减小，当调制电流增大使得 $\epsilon S \rightarrow 1$ ，光增益减小，导致开关时间上升，因此必然存在一个调制电流使得开关时间最短。图 3(b) 给出的最佳调制电流近似为 40mA。

在 LD 脉冲调制响应中,产生阻尼弛张振荡的因素除在本文第二部分提到的一些之外,LD 寄生电容也有一定的影响,当然对最佳调制电流也会有影响。图 4 给出 $C_s = 1$

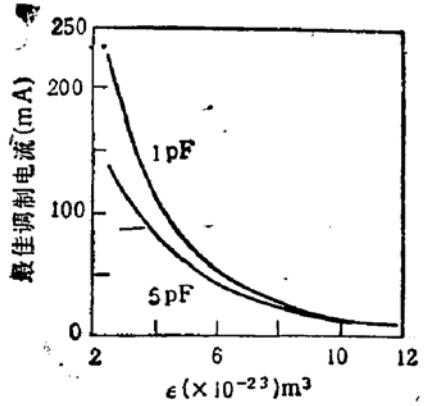


图 4 最佳调制电流与 σ 的关系, $\beta = 10^{-4}$

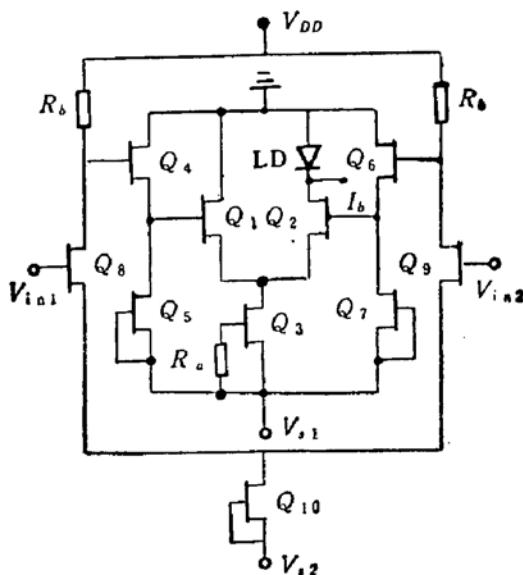
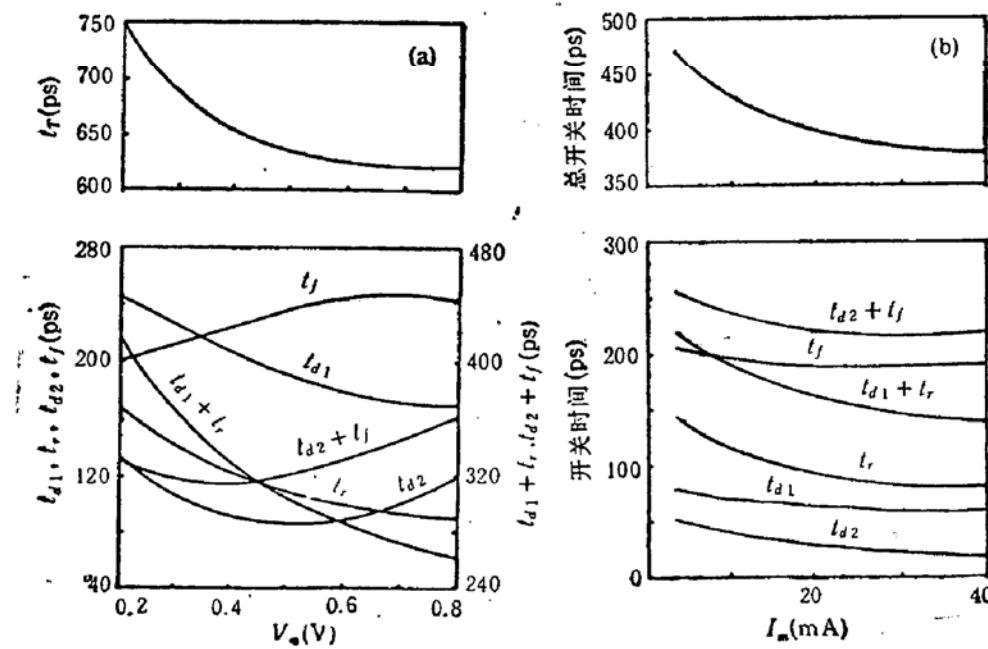


图 5 OEIC 光发射机电路图



(a) OEIC 开关特性,

(b) LD 开关特性

pF , $5pF$ 两种情况下最佳调制电流与增益压缩因子的关系。可以看到, 最佳调制电流近似以 $1/\epsilon^2$ 的形式变化, ϵ 增大, 使其降低, 当 $\epsilon > 8 \times 10^{-23} m^3$ 时有明显的阻尼作用。

2. 对 OEIC 光发射机的模拟分析

图 5 为 OEIC 光发射机电路图^[18], $R_b = 300\Omega$, $R_a = 1k\Omega$, $V_{s1} = -5V$, $V_{s2} = -9V$, $V_{DD} = -3V$, V_{in2} 加参考电压 $-7.5V$, 调制信号加于 V_{in1} , V_{in1} 的初始偏置为 $-7.9V$, $I_b = 22mA$. LD, MESFET 的模型参数同前面给出, 增益压缩因子取 $6.7 \times 10^{-23} m^3$.

图 6(a) 为模拟得到的 OEIC 开关时间与调制信号幅度的关系, 加于 V_{in1} 端的调制电压低电平为 $0V$, 幅度 V_m 在 $0.2V$ — $0.8V$ 范围内, 相应的, LD 的调制电流 3.87 — $35.3mA$. V_m 之所以选在这个范围内, 主要考虑了 MESFET 的饱和工作区。图中可见, 随 V_m 增大, t_{d1} , t_s 逐渐减小, 但 t_{d2} 在 $0.5V$ 附近出现一极小值, 近似为 $90ps$, t_f 缓慢上升, 总的开关时间 $t_T = t_{d1} + t_s + t_{d2} + t_f$, 在 $V_m < 0.5V$ 时, 随 V_m 增大由 $750ps$ 迅速减小, 当 $V_m > 0.6V$ 时, 基本上保持不变, 近似为 $620ps$. 对驱动电路的模拟结果表明, 当 V_m 从 $0.2V$ 提高到 $0.8V$ 时, 其总的开关时间由 $425ps$ 下降到 $390ps$, 变化不大。决定 OEIC 总开关时间 t_T 随 V_m 的变化趋势的是 LD 自身开关性能。图 6(b) 给出了 LD 开关时间随调制电流的变化, 对应 V_m 的变化范围 0.2 — $0.8V$, 流经 LD 支路的调制电流幅度为 3.87 — $35.3mA$, 由图 6(b) 可见, 在这一范围内, LD 总开关时间由 $465ps$ 下降到 $370ps$. 至于为什么 OEIC 总的开关时间小于驱动电路与 LD 总开关时间之和, 可以从图 7 得到说明, 图 7 给出了梯型调制信号 (幅度为 $35mA$) 的上升时间 t_{rs} 和下降时间 t_{rf} 对 LD 开关时间的影响, 图中可见, 随 t_{rs} ($=t_{rf}$) 增大, LD 总开关时间也随之增大, 但其增量总是小于 $t_{rs} + t_{rf}$. 这说明, LD 具有一定的整形能力。

由上述分析可见, 要提高该 OEIC 光发射机的开关性能, 除适当考虑驱动电路的开关时间及适当选择调制信号的幅度外, 更主要的是提高 LD 自身的开关性能。减小光子寿命, 提高光增益系数^[7], 减小寄生电容等都是行之有效的直接方法。

四、结 论

本文给出一个新的 LD 动态调制分析模型, 该模型对 LD 小信号, 大信号瞬态分析都适用, 具有等效电路简单, 使用方便等特点, 可在编写 OEIC 专门分析程序中使用, 亦可直接引入现有电路分析软件中。对单个 LD 的模拟结果表明, 增益压缩因子 ϵ 对 LD 开关时间及弛张振荡的影响与 LD 偏置及调制电流的幅度有关, 对于 LD 偏置在阈值附近, 调制电流为几十 mA 量级, ϵ 大于 $10^{-23} m^3$ 时有明显的阻尼作用。对于给定 ϵ , 有一最佳调制电流 I_{mop} , 使得 LD 的开关时间最小, 同时弛张振荡幅度也很小。 I_{mop} 近似正比于 $1/\epsilon^2$. 对 OEIC 光发射机分析结果表明, 随调制信号幅度增大, 开关时间迅速减

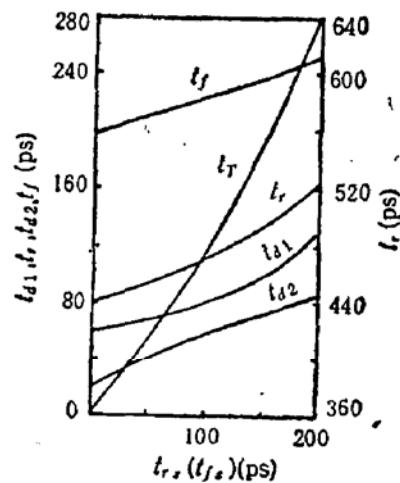


图 7 LD 开关时间随梯型调制信号的上升, 下降时间的变化

小，并趋于稳定，决定这种变化趋势的是 LD 自身开关性能，趋动电路的开关时间随调制信号幅度变化不大。当调制信号幅度大于 0.6V 时，该 OEIC 的开关时间基本上为一恒定值 620ps，理论上该 OEIC 脉冲调制速率可达 3 Gbit/s。

参 考 文 献

- [1] J. Katz, S. Margalit, C. Harder, D. Wilt, and A. Yariv, *IEEE J. Quantum Electro.*, QE-17, 4(1981).
- [2] R. S. Tucker, *IEE Proc.*, 128, Pt. 1, No. 3, 101(1981).
- [3] R. S. Tucker, and D. J. Pope, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, MTT-31, 293(1983).
- [4] R. S. Tucker, and D. J. Pope, *IEEE J. Quantum Electro.*, QE-19, 1179(1983).
- [5] 李维且, 严志新, 王晨, 潘慧珍, *电子学报*, 17,(2), 105(1989).
- [6] R. S. Tucker, *IEE Proc.*, 128, Pt. 1, No. 5, 180(1981).
- [7] R. S. Tucker, *J. Lightwave Tech.*, LT-3, 1180(1985).
- [8] 洪先龙等, *计算机辅助电路分析*, 第五章, 清华大学出版社, 1982.
- [9] W. R. Curtice, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, MTT-28, 448(1980).
- [10] C. H. Hyun, M. S. Shur, and A. Peczalski, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-33, 1421(1986).
- [11] M. S. Shar, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-32, 70(1985).
- [12] K. Furuya, Y. Suenatsu, and T. Hong, *Appl. Opt.* 17, (12), 1949(1978).
- [13] P. M. Boers, and M. T. Vlaardingerbrek, *Electron. Lett.*, 11, 206(1975).
- [14] M. J. Adams, and M. Osinski, *Electron. Lett.*, 19, 627(1983).
- [15] J. E. Bowers, T. L. Koch, B. R. Hemenwy, D. P. Wilt, T. J. Bridges, and E. G. Burkhardt, *Electron. Lett.*, 21, 297(1985).
- [16] D. J. Channin, *J. Appl. Phys.*, 50, 3858(1979).
- [17] R. S. Tucker, I. P. Kaminow, *J. Lightwave Tech.*, LT-2, 385(1984).
- [18] H. Nakano, S. Yamashita, T. P. Tanaka, M. Hirao, and M. Maeda, *J. Lightwave Tech.*, LT-4, 574(1986).
- [19] T. Takada, K. Yokoyama, M. Ida, and T. Sudo, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, MTT-30, 719 (1982).
- [20] R. S. Tucker, J. M. Wiesenfeld, P. M. Downey, and J. E. Bowers, *Appl. Phys. Lett.*, 48, 1707(1986).
- [21] R. S. Tucker, *Electron. Lett.*, 20, 802(1984).

Study and Application of LD Model for Simulation Dynamics

Chen Weiyou and Liu Shivong

(Department of Electronics Science, Jilin University, Changchun, 130023)

Abstract

A new modulation dynamic model of LD is presented. The effects of gain compression and the amplitude of modulation signal on switch time and relaxation oscillation of LD are discussed. There is an optimum modulation current of which switch time and relaxation oscillation amplitude become minimal for a given ε . The switching transient of OEIC has been analyzed, the dependence of the OEIC switch ability on signal amplitude, LD and driving circuits switching transient is discussed.