

外泵浦相位共轭激光器的类三极管 特性与阈值开关特性

刘 劲 松

(西北电讯工程学院技术物理系)

摘要——通过对外泵浦相位共轭激光器 (EPPOL) 的工作状态同三极管放大电路的工作状态的对比, 发现 EPPOL 具有同三极管相类似的工作状态。此外, EPPOL 的输入与输出光强之间的关系具有阈值开关特性。

一、引 言

在人们研制光计算机的过程中, 已先后提出并实现了许多逻辑光路^[1,2], 构造出了光三极管模型^[3], 但都不够完善。为此, 我们分析了近几年发展起来的外泵浦相位共轭激光器 EPPOL^[4] (Externally Pumped Phase Conjugate Laser)。它具有类三极管特性, 可望用它实现由一个弱光学信号控制另一个强光学信号, 以及在适当条件下对弱光学信号进行放大和整形。此外, 它的输入和输出光强之间的关系具有阈值开关特性。所以, EPPOL 不仅可做为一种新型激光器, 而且有望成为光三极管和光逻辑器件。本文对 EPPOL 之所以具有以上特性的物理根据进行了分析, 并指出了 EPPOL 的应用前景。

二、基本公式

图 1 是 EPPOL 光路图。由反射镜 RM, 激活介质 GM 及相位共轭反射镜 PCM (Phase Conjugate Mirror) 组成。PCM 工作在简并四波混频状态。 I_c 、 I_b 、 I_p 及 g_0 分别代表 EPPOL 的输出光强、PCM 泵浦光强、GM 泵浦光强和小信号增益系数。在图 1 中, 四个偏振方向相同、频率相同的线偏光 A_j ($j=1, 2, 3, 4$) 分别代表 PCM 的两个沿相反方向传播的泵浦光、信号光及共轭光, 并设

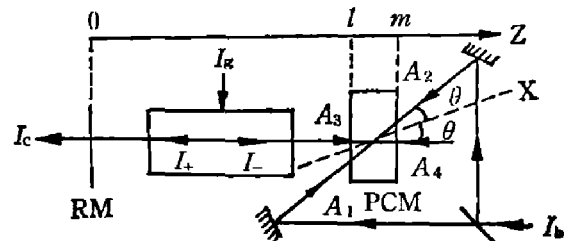


图 1 EPPOL 的光路图
Fig. 1 Optical path of the EPPOL.

$$A_j(r, t) = \frac{1}{2} \tilde{E}_j(r, t) \exp[i(\omega t - \mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r})] + c \cdot c; \quad (1)$$

式中, \tilde{E}_j 为 A_j 的复振幅。设 $I_j = 1/2 |\tilde{E}_j|^2$ 为相应光束的光强。在慢变化包络近似及绝热极限条件下, 根据非线性光学理论, 可以推得, 对均匀非磁电介质, 非共振简并四波混频的大信号耦合方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dX} \tilde{E}_1 &= -2i\gamma \tilde{E}_2^* \tilde{E}_3 \tilde{E}_4 - i\gamma(2I_0 - I_1) \tilde{E}_1; \\ \frac{d}{dX} \tilde{E}_2 &= -2i\gamma \tilde{E}_1^* \tilde{E}_3 \tilde{E}_4 - i\gamma(2I_0 - I_2) \tilde{E}_2; \\ \frac{d}{dX} \tilde{E}_3 &= -2i\gamma \tilde{E}_4^* \tilde{E}_1 \tilde{E}_2 - i\gamma(2I_0 - I_3) \tilde{E}_3; \\ \frac{d}{dX} \tilde{E}_4 &= -2i\gamma \tilde{E}_3^* \tilde{E}_1 \tilde{E}_2 - i\gamma(2I_0 - I_4) \tilde{E}_4; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, X 是图 1 中所示的空间坐标; $I_0 = \sum_{j=1}^4 I_j$; $\gamma = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \omega \chi^{(3)} \cos \theta$; 2θ 是 A_1 与 A_3 夹角。

在图 1 中, I_{\pm} 是 EPPOL 内沿左、右方向传播的腔内光强。在 POM 反射面上, 有 $I_+ = I_3$, $I_- = I_4$ 。忽略激活介质的损耗, 则有

$$\frac{dI_{\pm}}{dz} = \frac{g_0 I_{\pm}}{1 + (I_+ + I_-)/I_s}; \quad (3)$$

式中, I_s 为 EPPOL 饱和光强。设 R_0 与 R 分别为 RM 与 POM 反射率, h 与 l 分别为 POM 与 GM 长度, I 为 I_- 在 POM 入射面上的值。在对称泵浦 POM 条件下, 由式 (2)、(3) 可得:

$$\int_0^{\sqrt{RI}} [(I_b/2 - RI + y^2)(I_b/2 - y^2)(I + RI - y^2) - y^2(2y^2 - I - 2RI)^2/16]^{-\frac{1}{2}} dy = 2\gamma h; \quad (4)$$

$$I = I_s \sqrt{R_0} (2g_0 l + \ln RR_0) / [2(\sqrt{R} + \sqrt{R_0})(1 - \sqrt{RR_0})]; \quad (5)$$

$$I_0 = I_s (1 - R_0) \sqrt{R} (2g_0 l + \ln RR_0) / [2(\sqrt{R} + \sqrt{R_0})(1 - \sqrt{RR_0})]。 \quad (6)$$

数值求解式 (4), 并利用曲线拟合法, 得到如下近似关系:

$$R = R_m I_b / [I_b + 2IR_m(R_m/4 + 1)]; \quad (7)$$

式中, R_m 是和 γh 有关的一个常数。当 I_b 很小时, R 也很小; 当 $I_b \rightarrow \infty$ 时, $R \rightarrow R_m$ 。当 g_0 改变时, I 随之改变。因此, 不同的 g_0 对应不同的 R 。联立求解式 (5~7), 就可求得 I_b 、 g_0 及 I_0 之间的关系。式 (7) 是在假定 $2\gamma h = 10^{-9}$ (SI) 条件下得到的; 在此条件下, $R_m = 1$ 。

三、特性分析

1. EPPOL 的类三极管特性

图 2 为熟知的三极管放大电路及其输出特性曲线。在不同的静态工作点下, 三极管可处于截止、放大及饱和三种工作状态。在不同状态下, 集电极电流 i_c 与基极电流 i_b 之间的关系不同。联立求解式 (5~7)。得到 EPPOL 的 I_b 、 g_0 及 I_0 之间的关系如图 3 所示。

从图 3 可看出, 对于每个给定的 g_0 , I_0 随 I_b 的变化也呈现出截止、放大及饱和三种工作状态。为了进一步同三极管放大电路作对比, 图 4 给出了以 I_b 为参数时 I_0 随 g_0 的变化规律。对比图 2 与图 4 可看到, I_b 、 I_0 及 g_0 之间的关系在形式上同 i_c 、 i_b 及集射结电压 U_{ce} 的关系一样。令 $B = I_0/I_b$, 称之为 EPPOL 的信号放大倍数。将图 4 所反映的 EPPOL 的特性同三极管放大电路特性做对比 (见表 1)。通过对比可以看到, EPPOL 和三极管放大

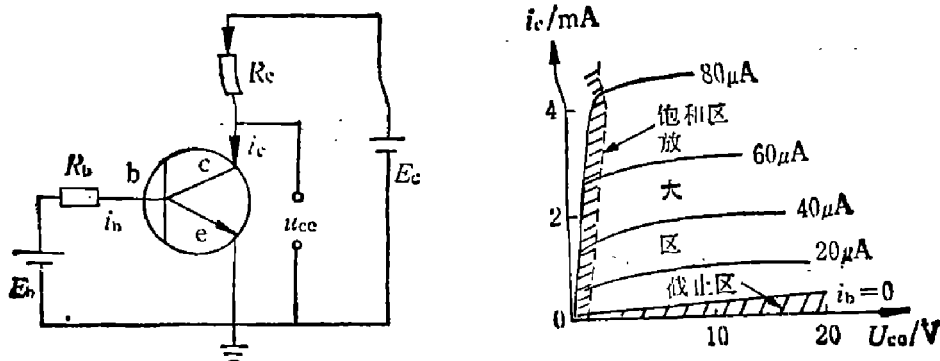


图 2 三极管放大电路及其输出特性曲线

Fig 2. Transistor amplifier circuit and its output characteristic curve.

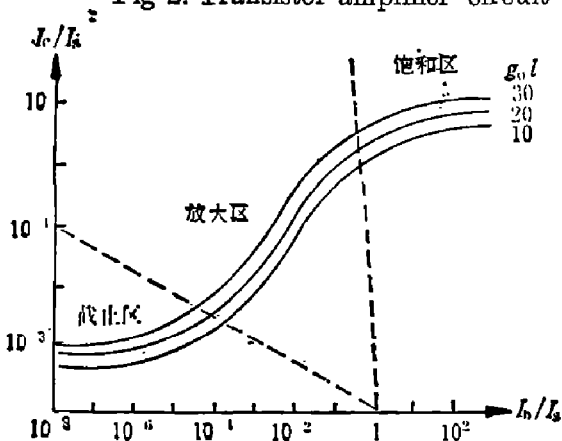


图 3 EPPCL 的 I_b 、 I_o 及 g_o 之间的关系
Fig. 3 Relations among I_b 、 I_o and g_o of the EPPCL.

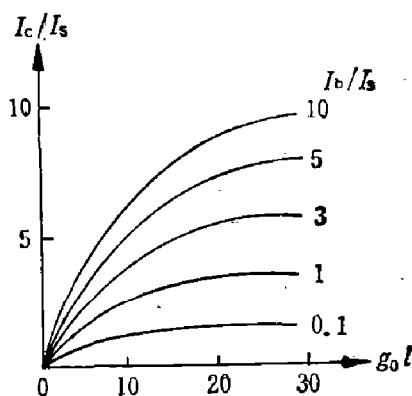


图 4 EPPCL 的输出特性曲线
Fig. 4 Output characteristic curve of the EPPCL.

表 1 EPPCL 同三极管放大电路工作特性的比较

Table 1 Comparison of characteristics between the EPPCL and transistor amplifier circuit

工作状态	工 作 特 性	
	EPPCL	三极管
截止区	I_b 小于某一定值后, $I_c = 0$, EPPCL 无激光输出。	$i_b \leq 0$, $i_c = 0$, 三极管如同断开。
放大区	$I_c = BI_b$, I_c 受 I_b 控制。当 $B > 1$ 时, I_b 被放大。	$i_c = \beta i_b$, i_c 受 i_b 控制。
饱和区	I_c 由 g_o 决定, I_c 不受 I_b 控制, EPPCL 输出光强为一恒定值。	$i_c = E_c/R_c$, i_c 不受 i_b 控制, 三极管如同短路

电路之间具有非常相似的工作特性。我们称之为 EPPCL 的类三极管特性。其主要特征就是 EPPCL 对光信号的处理同三极管放大电路对电信号的处理在形式上有许多共同之处。所以, EPPCL 可以作为光三极管来使用。其输出特性曲线上点 $Q_o(I_b, I_o, g_o)$, 也可以象三极管放大电路的静态工作点 $Q(i_b, i_o, U_{ce})$ ——三极管输出特性曲线上的点那样, 称之为 EPPCL 的静态工作点, 用以表征 EPPCL 所处的工作状态。

2. 波形的失真与整形

在三极管放大电路中, 若 Q 值选得不适当, 在动态时会存在截止失真与饱和失真。EPPCL 也存在着类似的问题。若在 I_b 上调制一个时间周期为 2τ 的正弦信号: $\tilde{I}_b = 0.5I_b \sin \frac{\pi t}{\tau}$, $t \in [0, 2\tau]$, 则 PCM 总的泵浦光强为 $I_b + \tilde{I}_b$ 。此时 EPPCL 的输出光强也可

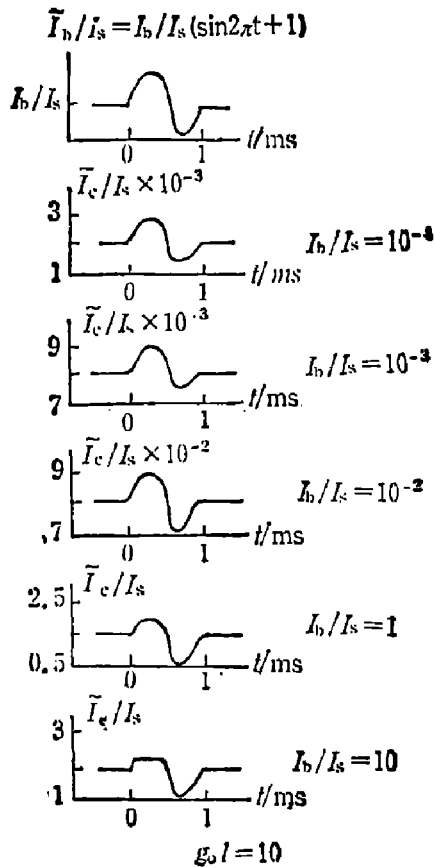


图5 EPPCL的截止失真与饱和失真
Fig. 5 Cut-off and saturation distortions of the EPPCL.

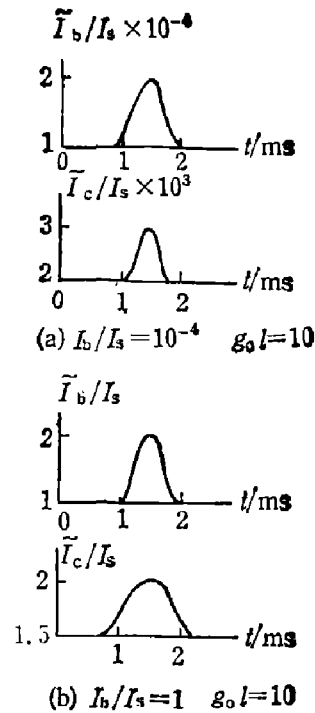


图6 EPPCL的脉冲压缩与增宽
Fig. 6 Pulse narrowing and stretching of the EPPCL.

相应地写为 $I_c + \tilde{I}_c$ 。在准稳态近似下, 联立求解式(5~7), 得到了在不同的 $Q_0(I_b, I_c, g_0)$ 下, \tilde{I}_c 随 \tilde{I}_b 的变化形式, 如图5所示。

从图5可以看到, 当 I_b 较小时, \tilde{I}_c 为一个下半部被切掉的正弦函数, 这种 \tilde{I}_c 相对于 \tilde{I}_b 的失真可称之为 EPPCL 的截止失真。随着 I_b 的增大, 截止失真变小。在适当的 $Q_0(I_b, I_c, g_0)$ 下, 失真消失。当 I_b 再增大时, \tilde{I}_c 为一个上半部分被切掉的正弦函数, 这种 \tilde{I}_c 相对于 \tilde{I}_b 的失真可称为 EPPCL 的饱和失真。 I_b 越大, 饱和失真越严重。

若给 I_b 上调制一个半宽度为 τ 的脉冲信号 \tilde{I}_b , 在轻度截止(或饱和)时, \tilde{I}_c 相应的变化形式是一个半宽度小于(或大于) τ 的脉冲函数。因此, 选择适当的 $Q_0(I_b, I_c, g_0)$ 值, 在动态下 EPPCL 具有对输入光信号进行整形的功能。图6是在准稳态近似下, 联立求解式(5~7)所得到的结果。(a)反映的是在轻度截止时的脉冲压缩现象。(b)反映的是在轻度饱和时的脉冲增宽现象。

同三极管放大电路相类似, 还可引入 EPPCL 动态信号放大倍数 $\tilde{B} = \Delta I_c / \Delta I_b$ 。当 g_0 足够大后, $\tilde{B} > 1$ 。所以, EPPCL 具有将入射在 PCM 上的光脉冲信号同时放大与整形的功能。

3. EPPCL 的阈值开关特性及其逻辑功能

将 I_b 视为 EPPCL 的输入光强, 图3所反映的 I_c 与 I_b 的关系具有典型的非线性器件的输入—输出特性, 即具有阈值开关特性。图3中的截止、放大及饱和区亦可称之为亚阈值段、模拟工作段及饱和段。因此, 可利用 EPPCL 实现“或”、“与”逻辑功能以及做成相应于光学功率限幅器的光学器功, 如图7所示。

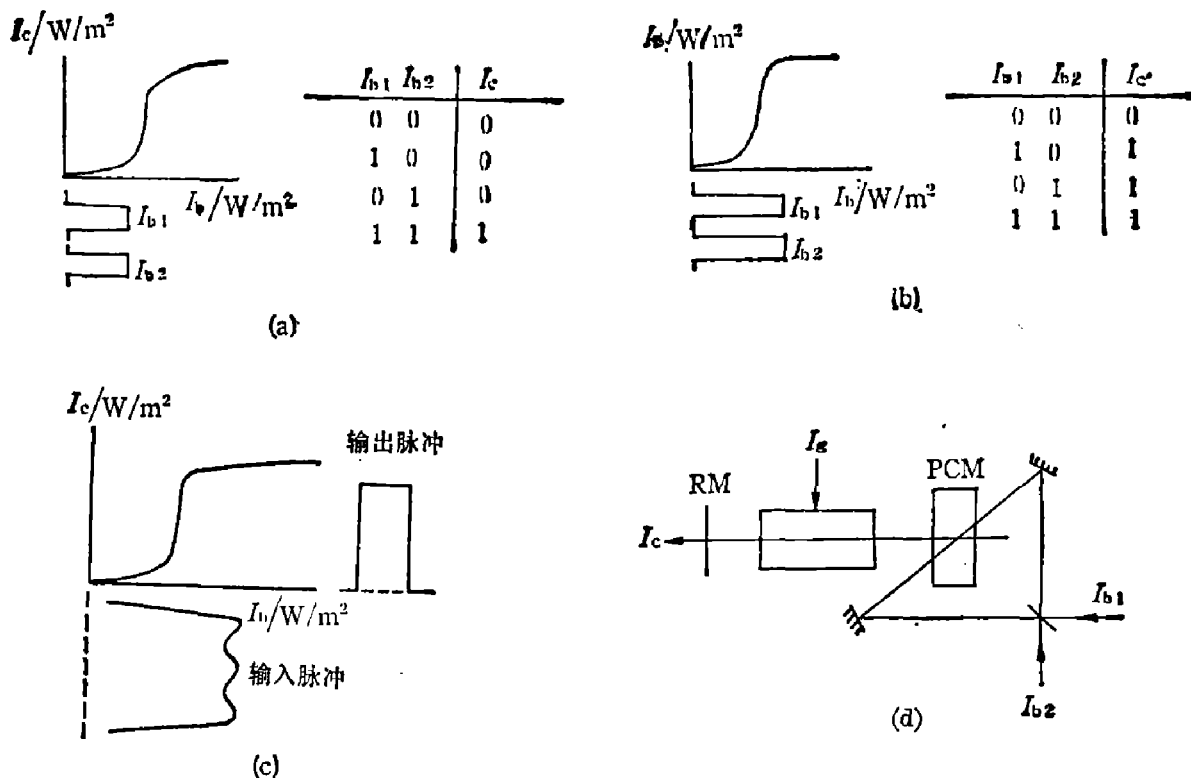


图7 EPPCL 阈值开关特性的潜在应用

(a) 光学逻辑“与”门 (b) 光学逻辑“或”门 (c) 光学功率限幅器
(d) 实现“与”门及“或”门的 EPPCL 光路图

Fig. 7 The potential applications of the EPPCL's threshold switching characteristic

(a) Optical logical AND gate. (b) Optical logical OR gate. (c) Optical power limiter.
(d) The Optical path diagram of EPPCL for realizing the AND as well as OR gate.

4. EPPCL 输出特性的物理根据

EPPCL 之所以具有类三极管特性及阈值开关特性,主要是由于它的 PCM 反射率 R 是由式(7)所决定的 g_0 以及 I_b 的函数。而 EPPCL 和一般激光器的本质差别也正在于此。因此, EPPCL 的工作状态不仅由 g_0 决定,同时和 I_b 也密切相关。对于一个给定的 g_0 ,当 I_b 很小时, R 太小, EPPCL 的透射损耗过大,激光振荡不能形成;因此, EPPCL 只有荧光输出,我们称此时的 EPPCL 处于截止状态,或处在亚阈值段。随着 I_b 的增大, R 也随之增大。当 R 增大到使 EPPCL 的激光振荡得以形成时, EPPCL 的输出光强 I_o 将随着 I_b 的变化而变化。当 g_0 适当大时,从形式上看, I_b 被放大 B 倍后以 I_o 的形式输出, I_o 受 I_b 的控制。我们称这时 EPPCL 工作在放大区,或模拟工作段。当 I_b 足够大后, R 达到了饱和,不再随 I_b 的改变而变化;因此, I_o 就只与 g_0 有关,而不再受 I_b 的控制。此时 EPPCL 便处在所谓饱和区。所以, PCM 反射率同泵浦光强及腔内光强有关是 EPPCL 具有类三极管特性和阈值开关特性的物理根据。

5. 可行性探讨

从小型化和易于集成的角度看,半导体材料最适合用于制造 EPPCL。如 GaAs 半导体材料,具有较大的三阶电极化率 $\chi^{(3)}$,一般在 $10^{-20} \sim 10^{-30}$ (SI) 量级^[5]。式(2)中 γ 的表达式为

$$\gamma = 3/8 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \omega \chi^{(3)} \cos \theta;$$

式中,取 $\theta = 5^\circ$, $\omega = 2 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$, $\mu = 1$, $\epsilon = 4$, $h = 10^{-8} \text{m}$;则 $2h\gamma$ 的量级为 $10^{-8} \sim 10^{-19}$ (SI)、

故取 $2h\gamma=10^{-9}$ (SI) 是能够达到的。以 GaAs 激光器为例, 小信号增益系数 g_0 满足关系 $g_0 = \beta j^m$, 对双异质结情况, 有 $m=2$, $\beta=10(\text{cm/kA})$ [6]; 若 $j=10\sim 20 \text{ kA/cm}^2$, 则 $g_0=(1\sim 4) \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 。一般半导体激光器的增益介质长为 $l=0.02 \text{ cm}$, 则 $g_0 l=20\sim 80$ 。故 $g_0 l$ 取 $10\sim 30$ 对半导体激光器来说是易于办到的。半导体的饱和光强, 如 GaAs, 在 10^2 W/cm^2 量级 [5]。一般半导体激光器的输出功率可达 10 W ; 若光斑面积为 1 mm^2 , 则输出光强为 10^3 W/cm^2 。故 I_o/I_s (及 I_c/I_s) ≤ 10 是可行的。综上所述, 用目前的半导体材料, 已有希望制造出符合本文要求的 EPPOL。

四、结 论

EPPOL 有希望作为一个光三极管, 它的一个直接应用前景, 就是可以作为光纤通信中的中继器件。此外, EPPOL 的输入与输出光强间的关系具有阈值开关特性, 可以做为光逻辑门, 实现“或”、“与”逻辑功能。用目前的半导体材料, 已有希望制造出符合本文要求的 EPPOL。作为一种本征型非线性器件, EPPOL 不需要进行信号间的光电相互转换。它的输入和输出信号具有同一信息载体, 因而具有能效高、噪声低、易于传输和串联等优点。

参 考 文 献

- [1] Fatchik M. T. et al., *Appl. Opt.*, **20**(1981), 13: 2850.
- [2] Taylor H. F., *Appl. Opt.*, **17**(1978), 10: 1493
- [3] Smich P. W., *Opt. Eng.*, **19**(1980), 4: 456.
- [4] Feinberg J. et al., *Opt. Lett.*, **5**(1980), 12: 519.
- [5] Robert A. F., *Optical Phase Conjugation*, 1983, 307~403.
- [6] 蔡伯荣等编, 激光器件, 湖南科学技术出版社, 1981, 277~346.

TRANSISTOR-LIKE AND THRESHOLD SWITCHING CHARACTERISTICS OF EXTERNALLY PUMPED PHASE CONJUGATE LASER

LIU JINSONG

(Department of Technical Physics, Northwest Telecommunication Engineering Institute)

ABSTRACT

It is discovered by comparison that the working condition of an externally pumped phase conjugate laser (EPPOL) bears a strong resemblance to that of the transistor amplifier circuit. In addition, the relationship between the EPPOL's output and input intensities of light possesses a threshold switching characteristic.