

双反馈 F-P 光振荡现象

李永贵 张洪钧

(中国科学院物理研究所)

1982 年 1 月 12 日收到

提 要

本文介绍一种带有两个光电反馈回路 F-P 被动式光振荡器。该振荡器将连续的光输入转变成交变的光学多谐振荡输出和光学正弦信号输出。本文分析了产生振荡的原理, 还给出了与分析相一致的实验结果。

一、引 言

自从 1977 年 Smith^[1] 首先提出用正比于 F-P 标准具输出光强的反馈信号来控制 F-P 标准具内的位相延迟实现“混合型”光学双稳运转以来, 文献 [2—4] 又报道了这类双稳装置的各种物理特性。1978 年, McCall^[5] 分析了光学双稳中的再生脉冲现象。1980 年, Bonifacio 从理论上证明了光学双稳中“自脉冲”现象的存在^[6]。后来, Okada 在无反射镜光学双稳的基础上, 加入第二个反馈, 观察了在双反馈情况下所产生的各种物理现象^[7]。这些研究提供了用光电方法产生光学振荡输出的新机制。

本文介绍一种带有双反馈回路 F-P 标准具产生的光学振荡现象。实验是在“混合型”非线性 F-P 标准具的基础上^[7,8], 引入第二个输出正比于标准具输出光强的电学放大回路, 控制标准具的腔长。当满足振荡条件时, 该装置将连续的光输入转换成交变的光强输出。

二、工 作 原 理

由两个平面镜组成的光学 F-P 标准具, 其输出特性在稳态时由下式决定:

$$x = T(\xi)u = \frac{u}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{\xi}{2}\right)}, \quad (1)$$

其中 x, u 分别表示输出和输入光强; $T(\xi)$ 为标准具的稳态透过率函数, $F = 4R/(1 - R)^2$ 为标准具细度, R 为镜面反射率; ξ 为光线在两镜间往返一个整程所经历的相移。

将标准具的输出光强经光电转换, 由两个不同时间常数的放大电路放大后, 相加, 再控制标准具的间距(或者相移), 就构成带有双反馈的 F-P 装置, 如图 1 所示。若将第一、第二反馈回路对相移 ξ 的贡献分别记作 φ 和 ψ , 两回路各具有时间常数 τ_1, τ_2 , 光强-位

相转换系数 a, ka , 初始偏置 φ_0, ϕ_0 , 则两反馈回路可用下述方程表达其动态特性:

$$\tau_1 \dot{\varphi} = \varphi_0 - \varphi + aT(\xi)u, \quad (2)$$

$$\tau_2 \dot{\phi} = \phi_0 - \phi + kaT(\xi)u, \quad (3)$$

$$\xi = \varphi + \phi. \quad (4)$$

这里假定了光在 F-P 腔内的建立时间远小于非振荡的电学反馈回路的弛豫时间. 记 $au \rightarrow u, ax \rightarrow x$, 由 (2)–(4) 式可得平衡态方程

$$x = T(\xi_0 + (1+k)x)u. \quad (5)$$

依 k 和 $\xi_0 = \varphi_0 + \phi_0$ 的选取, x 随 u 变化既可产生光学双稳现象, 又可产生光学振荡. 这里仅考虑振荡情况.

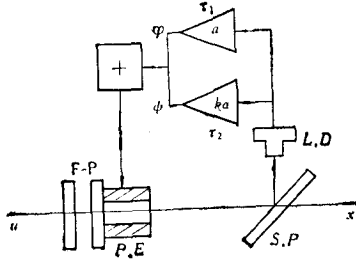


图 1

P. E 为压电陶瓷; L. D 为光电检测器; S. P 为分束器

由 (1) 式看出, 如果 $\xi(t)$ 随时间变化是振荡的, F-P 的输出 $x(t)$ 也将是振荡的. 设系统有平衡态点 $\bar{\varphi}, \bar{\phi}, \bar{x}$, 将方程 (2), (3) 在此平衡态点处展开, 取线性项, 记 $\varphi = \bar{\varphi} + p_1, \phi = \bar{\phi} + p_2$, 方程 (2), (3) 可化为

$$\dot{P} = AP, \quad (6)$$

$$b = \frac{1}{\tau_1} T'u, c = \frac{1}{\tau_2} kT'u, d = \frac{1}{\tau_2} (-1 + kT'u), \text{ 而 } T' = T'_\xi(\xi), \xi = \bar{\varphi} + \bar{\phi}.$$

设 A 矩阵的本征值为 $\alpha \pm i\beta$, 则系统稳定振荡的条件为

$$\alpha = 0, \quad \beta \neq 0; \quad (7)$$

振荡频率为

$$\omega = \beta. \quad (8)$$

A 阵的本征值很容易从 (6) 式求得

$$\alpha = \frac{1}{2} (a + d), \quad \beta = \frac{1}{2} [4(ad - bc) + (a + d)^2]^{\frac{1}{2}}.$$

于是振荡条件 (7) 式变为

$$(1 + k\tau)T'u = 1 + \tau, \quad (9)$$

$$(1 + k)T'u - 1 < 0. \quad (10)$$

振荡频率由 (8) 式得

$$\omega = \frac{1}{\tau_2} \sqrt{-\frac{1 + k/\tau}{1 + k\tau}}, \quad (11)$$

其中 $\tau = \tau_1/\tau_2 > 0$. 由 (9), (10) 式可得两组限制条件

$$-\frac{1}{\tau} < k < -\tau \quad (12)$$

$$(\tau < 1)$$

$$T' > \frac{1}{(1 - \tau)u} \quad (13)$$

或者

$$-\gamma < k < -\frac{1}{\gamma} \quad (12)'$$

$$(\gamma > 1).$$

$$T' < \frac{1}{(1-\gamma)u} \quad (13)'$$

条件 (13), (13)' 式表示在 u, γ 确定的情况下, 透过率曲线应当有一定的斜率. 条件 (12), (12)' 式限制了两反馈回路转换系数之比取值的范围. 由 $k < 0$ 知, 两反馈回路的输出是反相的. 有两种特例值得注意: 1) $\gamma = 1$ 时, 不管 k 为何值都不振荡, 该条件表明要产生振荡两回路的作用不能同步; 2) $k = -1$ 时, 除 $\gamma = 1$ 外, 都能振荡, 这意味着从平衡态看 F-P 标准具好象没有加反馈一样.

定性地看, 系统在 $k < 0, \gamma \neq 1$ 时才振荡似乎表明双反馈振荡的物理根源在于两反馈回路对 F-P 标准具的调制在不同的时间起不同的主导作用. 因为一个回路与 F-P 标准具构成正反馈, 另一个回路与之构成负反馈, 假如 F-P 的静态工作点被偏置在透过率曲线斜率的绝对值比较大的部分, 时间常数小的反馈回路, 例如正反馈回路, 在外界干扰下将先对 F-P 标准具起作用使光输出增加 (或减小), 时间常数大的反馈回路, 例如负反馈回路, 必定在滞后一段时间后再对 F-P 标准具起作用, 并慢慢抵销正反馈回路的作用使光输出减小 (或增加), 使系统的输出光强向静态工作点处所对应的输出光强趋近 (或远离). 一旦整个系统光输出减小 (或增大) 的趋势形成, 反馈快的正反馈回路又反过来加剧这种趋势, 使输出更减小 (或增大), 如此往复循环. 两回路反馈快慢和反馈量大小不同, 使某些时候正反馈占优势, 某些时候负反馈占优势, 由此导致 F-P 标准具有张弛振荡的光输出. 因此, 时间常数和反馈幅度决定着 ω . 由 (11) 式看出, 这种定性分析与定量计算是符合的.

振荡频率 ω 除与 τ_2 成反比外, $k \rightarrow -1/\gamma, \omega \rightarrow \infty; k \rightarrow -\gamma, \omega \rightarrow 0$; 当 γ 一定时, ω 可以通过 k 值而改变. 这提供了一种通过连续变化反馈电路的放大倍数而变频的手段.

输出的光振荡波形, 依赖于静态工作点的选择. 静态工作点由平衡态方程 (5) 和振荡条件 (9), (10) 式联立确定. 也可采用如下所述的图解法:

改写方程 (5) 为透过率曲线

$$T = T(\xi), \quad (14)$$

与负载线

$$T = \frac{1}{(1+k)u} (\xi - \xi_0). \quad (15)$$

1. 若 $1+k < 0$, 由振荡条件 (10) 式, $T' > \frac{1}{(1+k)u}$, 该不等式限定了工作点在

$T(\xi)$ 曲线上的动态范围.

1) 画 $T(\xi)$ 曲线. 2) 根据 (10) 式, 以 $1/(1+k)u$ 为斜率画直线, 该直线与 $T(\xi)$

曲线有切点 A , 如图 2(a). 3) 由 (9) 式知, 以 $(1+\gamma)/(1+k\gamma)u$ 为斜率画直线, 该直线与 $\widehat{AB}$ 的切点 C (或 C') 是静态工作点. 4) 过 C (或 C') 点, 以 $1/(1+k)u$ 为斜率画直线, 按照 (15) 式, 该直线与 ξ 轴的交点 ξ_0 (或 ξ'_0), 必为静态偏置点. 因为负载线斜率 $[1/(1+k)u] < 0$, 称负斜率方式工作.

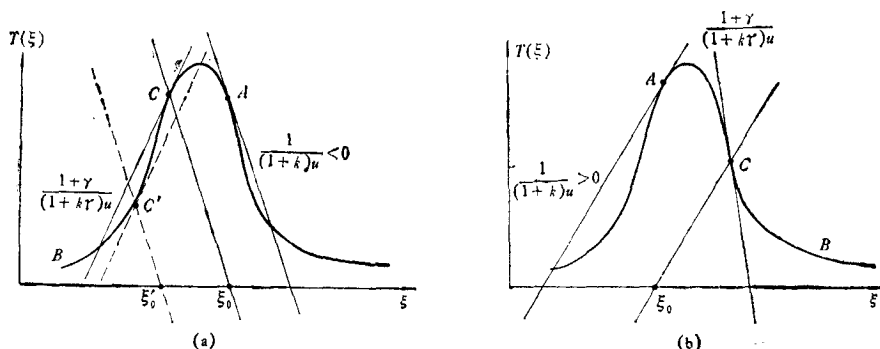


图 2 用图解法确定静态工作点和静态偏置

为使输出光的波形好, 静态工作点要选在 $T(\xi)$ 曲线上线性度比较好的地方, 为增加稳定性, $|1/(1+k)u|$ 应选的大一些.

2. 若 $1+k > 0$, 由 (10) 式, $T' < [1/(1+k)u]$. 与 1. 完全类似的作法, 得到静态工作点和静态偏置如图 2(b) 所示. 此时, 因负载线斜率 $[1/(1+k)u] > 0$, 故称正斜率方式工作.

原则上讲, 当 $T(\xi)$ 代表其它非线性光调制器的透过率函数时, 上述结论可推广到更一般的情况.

三、实 验

实验装置如图 3 所示. 输入的 He-Ne 光 p_i 通过反射镜反射率在 98% 左右的 F-P 标准具及分束器 SP 后, 得到输出 p_0 ; 输出光束由 SP 取样, 硅光电池 LD 转换, K_1, K_2, K 电学放大, 经偏置电源 V_b 将反馈信号加在压电陶瓷 PE 上, 从而改变 F-P 腔长. K_1, K_2

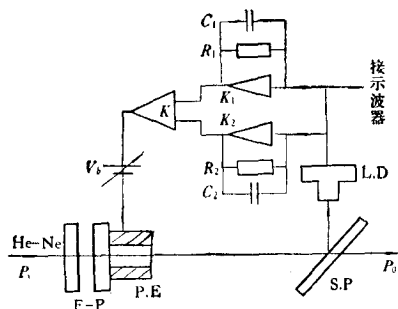


图 3 双反馈 F-P 光振荡实验装置

与上述迴路的连接分别组成第一和第二反馈. 放大器用 FC54D 型运算放大器, 通过改变并联其上的反馈电阻 R 、电容 C , 改变迴路的时间常数和转换系数.

在静态工作点的调整过程中, 只要保证 K_1, K_2 输出反相, 对给定的输入光强, 仔细调整 V_b , 使装置以正斜率或负斜率方式工作, 很容易得到满足振荡条件的静态偏置. 该实验中, $\gamma > 1$, 只观察了正斜率方式工作时的振荡输出.

由于静态工作点与输入光强大小有关, 因而要得到稳定的振荡, 对输入 u 有一定的限

制. 实验上观察到, 当系统被调整在某种状态时, 振荡幅度随 u 的增大而增大, 但增大到一定值时, 静态工作点的偏离使振荡波形被“单方向的限幅”, 限幅到波形近于“半波整流”时的波形时, 振荡突然熄灭, 其原因在于静态工作点进入非稳定区.

实验中, 频率的变化同理论分析一致. 不同的是输入 u 的变化对 ω 也有较小的影响. u 增大, ω 减小. 原因不太清楚, (11) 式不能反映这一点也许是线性分析带来的误差.

k 对 ω 影响极大. $\gamma > 1$ 时, 发现 $|k| \rightarrow$ 大, $\omega \rightarrow$ 小, 即 $k \rightarrow -\gamma$, $\omega \rightarrow$ 小, 这同 (11) 式的估计一致. 但是不存在 $k \rightarrow -1/\gamma$ 时 $\omega \rightarrow \infty$ 和 $k \rightarrow -\gamma$ 时 $\omega \rightarrow 0$ 的极端情况出现. 实验上当 ω 高于或低于某一值时 (由改变 k 值变化 ω), 再继续改变 k 就停振, 这说明了 k 对 $-1/\gamma$ 和 $-\gamma$ 的过份接近使系统进入非稳定振荡区, 这与 (12), (12)' 式的限制条件是相吻合的.

γ 对 ω 影响最大. 表 1 为 $k = -0.45$, $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$, $R_2 = 480 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 1000 \text{ pf}$ 时, 振荡周期 T 与 γ 关系的实验结果. 其中 γ 的变化以 C_1 的取值示出.

$C_1(\mu\text{F})$	.001	.047	.095	.347	.66	1.047	5.03
$T(\text{ms})$	不振	110	300	450	600	1250	不振

图 4 是 C_1 取不同值时拍摄的示波器照片. 照片中, 上线是放大器 K_1 的输出波形, 下线是 F-P 输出的光信号波形. 当 τ_1 与 τ_2 相差较小时, F-P 有接近于正弦波的光信号输出如图 4 (a), 相差较大时, 有类同于电学多谐振荡波形的光学多谐振荡输出.

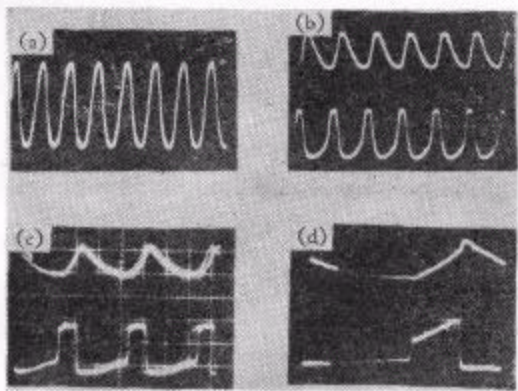


图 4 (a) C_1 为零时的正弦光信号输出; (b)~(d) C_1 分别为 $0.047 \mu\text{F}$, $0.66 \mu\text{F}$, $1.047 \mu\text{F}$ 时的 K_1 输出电压信号(上线)和 F-P 光振荡输出信号(下线)

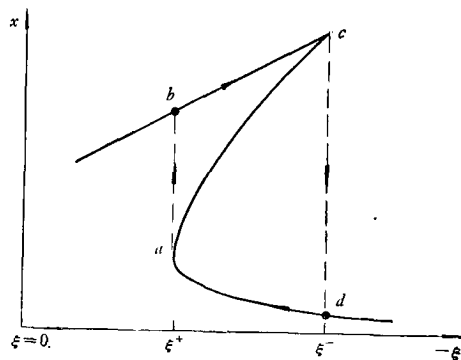


图 5 $x-\xi$ 线性调制特性

事实上, 当 τ_1, τ_2 相差较大时, 直观的看, 光输出与电容 C_1 的充放电联系. 当 $\tau_2 \ll \tau_1$ 时, 第二反馈回路同 F-P 构成一般的稳态光学双稳装置. 由方程 (1), (3), 稳态时得到线性调制特性^[8]

$$\xi = \varphi + \psi = \pm 2 \arcsin \sqrt{\frac{1}{F} \left(\frac{u}{x} - 1 \right)} - x. \quad (16)$$

曲线如图 5 所示. 随 ξ 的变化, x 沿箭头所示迴线方向变化. 一旦调整 ξ_0 使输出 x 在 ξ^+ 处突然增加, K_1 输出的增加使 C_1 充电, $|\xi|$ 增大. x 沿 bc 继续增大, C_1 加速充电 ($C_2 \ll C_1$, 第二反馈可看做稳态过程). 充电时间常数 $\tau = C_1 R_{01}$, 其中 R_{01} 是 K_1 的输出阻抗. 当 C_1 的充电使 φ 增大到 $\xi = \xi^-$ 时, x 突然沿 cd 减小到零, C_1 又通过 R_1 放电, 时间常数 $\tau = C_1 R_1$. φ 减小, $|\xi|$ 减小. 当 C_1 上电压降到 $\xi = \xi^+$ 时, x 又突然增加, 如此循环往复, 得到图 4 中光学多谐振荡输出. 光脉冲宽度由 ξ 在 (ξ^-, ξ^+) 范围内变化时 C_1 充电时间决定, 脉冲间隔由该范围内 C_1 的放电时间决定. 此外, 脉冲间隔与 ξ_0 的选取也有关.

四、结 论

采用双反馈的非线性 F-P 标准具可实现被动式光学振荡输出. 振荡频率由反馈迴路的时间常数和转换系数之比决定. 不同于激光器和电学振荡器驱动的电光调制器, 其振荡由光电双反馈形成, 因而提供了一种新的振荡机制. 从原理上讲, 一切非线性的相干或非相干光调制器, 都可以通过双反馈产生上述光学振荡.

参 考 文 献

- [1] P. W. Smith, E. H. Turner, *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 280.
- [2] P. W. Smith, *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-14**(1978), 207.
- [3] E. Garmire, *Appl. Phys. Lett.*, **34**(1979), 374.
- [4] 张洪钧等, *物理学报*, **30** (1981), 810.
- [5] S. L. McCall, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 284.
- [6] R. Bonifacio, *et al.*, *Opt. Commun.*, **33**(1980), 108; *Opt. Commun.*, **33**(1980), 113.
- [7] M. Okada and K. Takizawa, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-15**(1979), 1170; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-15**(1979), 82.
- [8] 李永贵等, *物理学报*, **31** (1982), 446.

PHENOMENON OF THE DOUBLE-FEEDBACK F-P OPTICAL OSCILLATION

LI YUNG-GUI ZHANG HONG-JUN

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The F-P passive optical oscillator with two feedback circuits is described. This oscillator transforms an input with continuous intensity of light into multi-vibrating optical pulses or optical sinusoidal signal output. The principle of oscillation is analysed. The experimental results in agreement with the analysis are presented.