

光学双稳性的静态稳定性和光强稳定器*

李淳飞 陈历学
(哈尔滨工业大学)

提 要

本文讨论了光学双稳态光强稳定器特性的物理量——静态稳定度 S 。据此分析了几种光学双稳态器件在稳态条件下输出光强的稳定性。指出对这种稳定性而言多光束干涉器件优于双光束干涉器件；非线性反馈优于线性反馈，尤以指数反馈为佳。本文还报道了具有指数反馈的电光混合光学双稳态光强稳定器的实验结果，获得了 $S \approx 50$ 的较高稳定度。实验结果与理论计算结果相符。

一、引 言

1978年 E. Garmire 曾经指出，采用非线性反馈对增强双稳性有利^[1]。1979年我们曾以实验证明了这个论断，采用非线性反馈获得了平坦的输出光强特性^[2]。1982年 Manabu Gomi 等人利用 PMN 电致伸缩器制成双稳态光强稳定器^[3]。这是一种具有平方型反馈的器件。他们获得了当输入光强相对变化 15% 时，输出光强相对变化 1/150 的结果。最近我们对光学双稳态器件输出光强的静态稳定性作了系统地分析，在此基础上选择具有指数反馈的电光偏振调制光学双稳态器件进行实验，研制成一种具有更高稳定度的光强稳定器：当输入光强相对变化 30% 时，输出光强仅相对变化 1/160。研究表明，若适当改进反馈放大器，不难得到 $S > 100$ 的稳定度。这种具有简单反馈电路的光强稳定器不仅具有较高的稳定度，并且适用于多模光源，可望获得推广应用。

二、光学双稳态器件的静态稳定度

光学双稳态器件（简称 OBD）一般由光调制系统和反馈系统两部分组成^[4]。调制系统主要有多光束干涉^[5]和双光束干涉^[2,6]两种类型。该系统的透射率 τ 与相移 ϕ 的函数关系我们称之为调制函数：

$$\tau \equiv \frac{I_t}{I_i} = \tau_M(\phi), \quad (1)$$

I_i 和 I_t 分别为入射光强和透射光强。透射光强经过取样、反馈引起相移变化：

$$\phi = \phi_0 + f(I_t), \quad (2)$$

ϕ_0 为初相移。函数 $f(I_t)$ 有线性的和非线性的两类。由 (2) 式和 τ 的定义可以得到透射率与相移的另一种函数关系，我们称为反馈函数：

收稿日期：1984年1月26日；收到修改稿日期：1984年4月10日

* 本研究受到中国科学院科学基金的资助。

$$\tau = \frac{f^{-1}(\phi - \phi_0)}{I_t} = \tau_F(\phi), \tag{3}$$

OBD 的 $I_t - I_i$ 特性曲线可以由(1)和(3)式通过图解法求得。例如对一个具有线性反馈的双光束干涉器件,其 $\tau_M(\phi)$ 曲线与相应于不同入射光强 $I_1 \sim I_5$ 的一簇 $\tau_F(\phi)$ 曲线相交于 $A \sim I$ 各点,见图1。求出这些交点对应的 I_t 和 I_i 值,可作图得到 $I_t - I_i$ 双稳延迟回线,如图2。

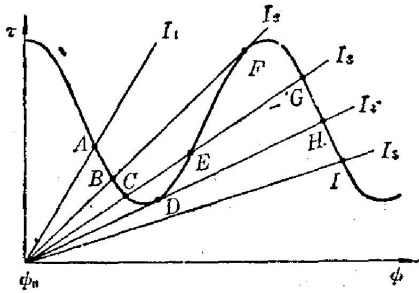


图1 线性反馈双光束干涉 OBD 的调制曲线和反馈曲线簇

Fig. 1 Modulation curve and feedback curve of a two-beam interference OBD with linear feedback

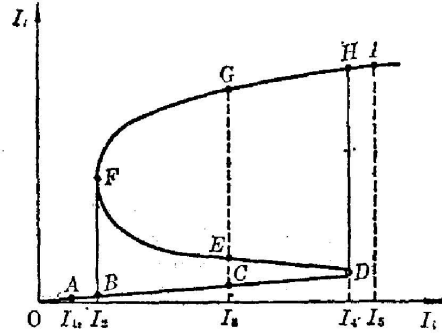


图2 线性反馈双光束干涉 OBD 的 $I_t - I_i$ 光学双稳态特性曲线

Fig. 2 Optical bistable characteristic curve of a two-beam interference OBD with linear feedback

为考察双稳特性曲线上各点的静态稳定性,我们定义一个称为静态稳定度 S 的物理量。它是入射光强和透射光强二者相对变化率之比:

$$S = \lim_{\Delta I_t \rightarrow 0} \frac{\Delta I_t / I_t}{\Delta I_i / I_i} = \tau \frac{dI_t}{dI_i} \tag{4}$$

将调制函数和反馈函数分别对 I_t 求导数,考虑到对一条反馈曲线 I_i 为常数,可以导出如下关系:

$$S = 1 - \frac{d\tau_M}{d\phi} / \frac{d\tau_F}{d\phi} \tag{5}$$

(5)式是光学双稳态器件输出光强静态稳定性的一个判别式。它说明某点的静态稳定度依赖于该点处调制曲线与反馈曲线斜率之比。

可以把静态稳定度分为三个区域: 稳定区、准稳区、非稳区。在这三个区域中 S 、 $\frac{dI_t}{dI_i}$ 和 $\frac{d\tau_M}{d\phi} / \frac{d\tau_F}{d\phi} = \tau'_M / \tau'_F$ 所满足的条件分别列于表1中。

表1 静态稳定区、准稳区和非稳区的划分

Table 1 The divisions of static stability quasi-stability and unstability

区域	S	$\frac{dI_t}{dI_i}$	τ'_M / τ'_F
稳定区	$S > 1$	$0 < \frac{dI_t}{dI_i} < 1$	$\tau'_M / \tau'_F < 0$
准稳区	$0 \leq S \leq 1$	$1 \leq \frac{dI_t}{dI_i} \leq \infty$	$0 \leq \tau'_M / \tau'_F \leq 1$
非稳区	$S < 0$	$\frac{dI_t}{dI_i} < 0$	$\tau'_M / \tau'_F > 1$

由表 1 可以看出: 稳定区的调制曲线与反馈曲线的斜率符号相反, 具有负反馈特性。在 I_r-I_i 双稳曲线上凡斜率小于 1 且大于零的各点, 如图 2 中的 A 、 C 、 G 、 I 各点, 是稳定的。该图中 O 和 G 是对应同一输入光强的一对双稳点。

准稳区和非稳区的调制曲线与反馈曲线的斜率符号相同, 同属于正反馈。不同的是准稳区的 I_r-I_i 曲线的斜率大于 (或等于) 1, 具有光放大特性。图 1 中调制曲线的极小点与 D 点间以及极大点与 F 间的线段属于此区。相应地在图 2 中接近 D 和 F 点的区域即为此区。趋近 D 和 F 点时剧烈增强的正反馈作用使 OBD 发生 $D \rightarrow H$ 点或 $F \rightarrow B$ 点的开关突变。对非稳区, I_r-I_i 曲线的斜率小于零, 图 1 和图 2 中的 DF 段属于此区。物理上不能实现这种负斜率状态, 因此处于此区的 E 点是不稳定的。

三、提高静态稳定度的措施

为提高 OBD 的静态稳定度, 必须选择合适的调制函数和反馈函数。据 (5) 式, 若调制曲线取负斜率, 则反馈曲线应取正斜率。若使调制曲线的斜率趋于负无穷大或使反馈曲线的斜率趋于零可以获得最大的稳定度 ($S \rightarrow \infty$)。

多光束干涉和双光束干涉器件的调制函数分别为

$$\tau_M = \frac{\tau_0}{1 + F \sin^2 \frac{\phi}{2}}, \quad (6)$$

$$\tau_M = \frac{\tau_0}{1 + M} (1 + M \cos \phi), \quad (7)$$

式中 τ_0 为无移相透射率, F 为与 F-P 干涉成精细度有关的常数, M 为调制度。假设这两种器件都采用线性反馈函数:

$$\tau_F = \frac{1}{KI_i} (\phi - \phi_0), \quad (8)$$

式中 K 为表征反馈强度的常数。由 (5) 至 (8) 式可以导出双光束干涉器件和多光束干涉器件的静态稳定度与相移的关系式分别为:

$$S = 1 + \frac{M(\phi - \phi_0) \sin \phi}{1 + M \cos \phi}, \quad (9)$$

$$S = 1 + \frac{F(\phi - \phi_0) \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\phi}{2}}. \quad (10)$$

图 3 绘出当 $M=0.90$, $\phi_0=-4$ 时的 $S-\phi$ 和 $\tau-\phi$ 曲线; 图 4 则绘出当 $R=0.90$, $F=330$ ($F = \frac{4R}{1-R^2}$), $\phi_0=-0.5$ 时的 $S-\phi$ 和 $\tau-\phi$ 曲线。比较两图可见:

- 1) 由于在峰值附近多光束干涉器件的调制函数比双光束干涉器件的调制函数更为陡峭, 因而前者比后者的静态稳定度更高。
- 2) 在线性反馈情况下, 多光束干涉器件 S 的峰值约在最大 τ 之半处, 而双光束干涉器件 S 的峰值处于 τ 的极小值附近, 因此前者比后者的最大静态稳定度对应于较大的透射率。

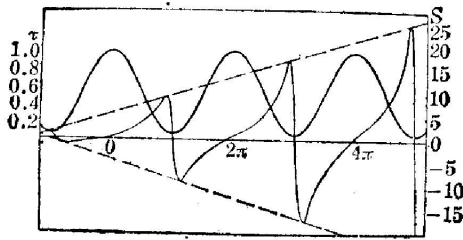


图 3 线性反馈双光束干涉 OBD 的静态稳定度与透射率对相移的关系曲线

Fig. 3 Static stability curve and transmittance curve of a two-beam interference OBD with linear feedback

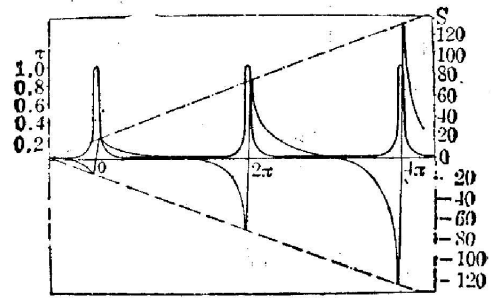


图 4 线性反馈多光束干涉 OBD 的静态稳定度与透射率对相移的关系曲线

Fig. 4 Static stability curve and transmittance curve of a multi-beam interference OBD with linear feedback

3) 两种器件在透射峰附近的静态稳定度皆随透射率的增大而迅速下降,也就是静态稳定度和透射率之间存在着矛盾关系。

4) 两种器件的静态稳定度都随透射峰级次的增大而增高,因此使器件工作于高级次的稳定区,也是提高静态稳定度的办法之一。

虽然多光束干涉器件比双光束干涉器件有较好的静态稳定性,但它需要使用单色光源,而且制造工艺要求较高。而双光束干涉器件适用于普通非单色光源,应用范围较广,只需改进反馈系统,同样可以达到较高的稳定度。

典型的反馈系统有三种类型:直线型、平方型和指数型。以下列表比较它们的反馈函数和静态稳定度公式:

表 2 三种典型反馈系统的反馈函数和静态稳定度

Table 2 Static stabilities and feedback functions of three typical feedback systems

反馈类型	$f(\phi)$	$\tau_T(\phi)$	S
直线型	KI_0	$\frac{1}{KI_0}(\phi - \phi_0)$	$1 + \frac{M(\phi - \phi_0)\sin\phi}{1 + M\cos\phi}$
平方型	KI_0^2	$\frac{1}{K^{1/2}I_0}(\phi - \phi_0)^{1/2}$	$1 + \frac{2M(\phi - \phi_0)\sin\phi}{1 + M\cos\phi}$
指数型	e^{KI_0}	$\frac{1}{KI_0}\ln(\phi - \phi_0)$	$1 + \frac{M(\phi - \phi_0)\ln(\phi - \phi_0)\sin\phi}{1 + M\cos\phi}$

在这三种情况中,显然其中两种非线性反馈器件比线性反馈器件的静态稳定度高;而在非线性反馈中以指数反馈的静态稳定度最高(当 $\phi - \phi_0$ 足够大时)。

四、指数反馈双稳态光强稳定器实验

本实验采用电光偏振调制器作调制元件,电光晶体是 z 切割的 LiNbO_3 晶体,尺寸为 $2 \times 2 \times 40 \text{ mm}^3$,半波电压 300 V。以 z 轴通光,而偏振器的偏振方向相互平行,与 ax 平面成 45° 。通过晶体的 o 光与 e 光间的相位差为

$$\phi = \frac{\pi}{V_x} (V + V_s), \tag{11}$$

式中 V_s 为剩余双折射引起的与零电压的偏差值。 V_x 为晶体的半波电压。 调制函数可以表为

$$\tau = \frac{\tau_0}{1+M} \left\{ 1 + M \cos \left[\frac{\pi}{V_x} (V + V_s) \right] \right\}. \tag{12}$$

这里 τ_0 为不加电压时器件的透射率, M 为消光因子。 采用偏振方向平行的一对偏振器, 是为了减少电光晶体的实际工作电压。

反馈放大器采用指数型的, 其输出电压为:

$$V_0 = D e^{E(KI_0 - V_r)}, \tag{13}$$

式中 V_r 为放大器输入端的参考电压, K 为光电探测器的光电转换系数, D 和 E 为放大器的可调电路参数。 加在晶体上的总电压为

$$V = V_B + D e^{E(KI_0 - V_r)}, \tag{14}$$

式中 V_B 为偏置电压。 由(5)式, 静态稳定度的表达式为:

$$S = \frac{1 + \frac{\pi M}{V_x} (V - V_0) \left(\ln \frac{V - V_B}{D} + E V_r \right) \sin \left[\frac{\pi}{V_x} (V + V_s) \right]}{1 + M \cos \left[\frac{\pi}{V_x} (V + V_s) \right]}. \tag{15}$$

在本实验条件下, 取 $M=0.8$, $\frac{\pi}{V_x}=0.01$, $D=2.6$, $E=22.5$, $V_r=0.6\text{ V}$, $V_B=-240\text{ V}$, $V_s=-20\text{ V}$, $\tau_0=0.8$ 。 在电压 V 的取值范围为 $80\sim 220\text{ V}$ 时, 即考察电压变化 30% 的幅度时, 中心电压 140 V 相应的平均静态稳定度 $\bar{S}=50.72$ 。 据(12)式, 算得相应的器件透射率为 0.576。

实验获得的双稳回线见图 5 示波器照片所示。 上稳态曲线十分平坦, 正是光强稳定器所需的。 从回线上还观察到从上态向下态跃变时产生的过冲现象。

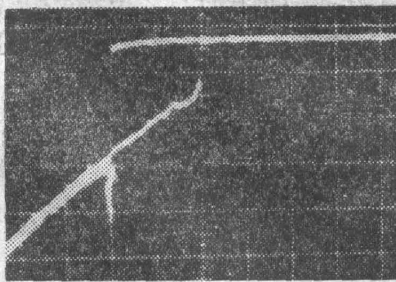


图 5 指数反馈偏振干涉 OBD 作为光强稳定器的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of the polarization interference OBD with exponential feedback as an optical stabilizer

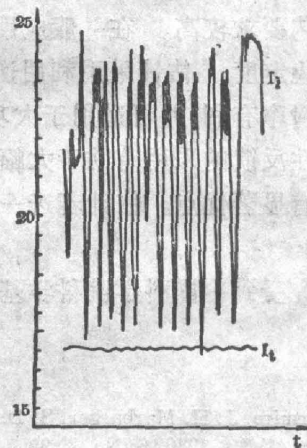


图 6 OBD 光强稳定器输入光强与输出光强随时间的变化

Fig. 6 The variation of input and output intensities for an OBD optical stabilizer with time

用 X-Y 记录仪测得的输入与输出光强度随时间的变化规律见图 6 所示。水平时间轴的单位为 10 秒/厘米。实验结果表明,当输入光强变化 30% 时,输出光强度变化仅为 1/160。测得静态稳定度 $\bar{S} = 48$, 与以上计算结果相当一致。

将指数反馈与线性反馈对比,由 (15) 式可见:指数反馈的稳定度比线性反馈的静态稳定度多一个 $\left(\ln \frac{V-V_B}{D} + EV_r\right)$ 因子。若取 $V_B = -330$ V, 其它参数与以上假设的相同,算得线性反馈的静态稳定度为 $S = 3.72$, 远比指数反馈器件的静态稳定度 $S = 50.72$ 低得多。若增大线性反馈器件的相移(增大电压 V), 那么必须在 8271 V 下, 即第 13 级双稳区方能得到 $S = 50.72$ 的静态稳定度, 而指数反馈器件如前所述只需 140 V 电压即可获得这样的稳定度。

在因子 $\left(\ln \frac{V-V_B}{D} + EV_r\right)$ 中, $\ln \frac{V-V_B}{D}$ 是指数放大单元的贡献, 而 EV_r 是前置差分放大单元的贡献。当工作电压为 140 V 时, 后项对静态稳定度的贡献占 70%。故在指数放大器中有必要引入比较放大单元。在我们的实验中, 若把 V_r 的数值提高 2 倍, 即可获得 $S = 100$ 的高稳定度。

五、结论与讨论

本文引入的静态稳定度 S 不仅可以用来表征光学双稳态光强稳定器的稳光强特性, 而且可用以描述光学双稳性静态工作的稳定性。以后我们要在另文中指出, 静态稳定度还是描述具有延时反馈的光学双稳性不稳定行为的重要参量。

将光学双稳态器件用于激光光强稳定是光学双稳性的第一个有价值的应用。这种方法比其它稳光强方法结构简单, 稳定度高。

显然多光束干涉器件比双光束干涉器件具有较好的静态稳定性, 但它对光源的单色性和制造工艺要求较高。在一般应用条件下宜采用双光束干涉器件, 可通过改进反馈系统提高其静态稳定度。估计采用利用逆压电效应驱动反射镜实现调相的双臂干涉装置, 对提高器件的透射率有利, 并可适用于大功率激光场合。该工作我们正在进行之中。

非线性反馈的采用有助于大幅度提高静态稳定度。特别是具有差动放大输入电路的指数型反馈有显著优点。估计若进一步采用限幅放大器有可能获得更好的结果。

本研究受到中国科学院科学基金的资助, 作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] E. Garmire, J. H. Marburger, S. D. Allen; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**, No. 5, 320.
- [2] 李淳飞;《物理》, 1980, **9**, No. 2, 99.
- [3] Marabu Gomi et al.; *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 14, 2616.
- [4] 李淳飞;《物理》, 1982, **11**, No. 11, 666.
- [5] 李淳飞, 许景春;《光学学报》, 1981, **1**, No. 2, 167.
- [6] 李淳飞, 季家铭;《光学学报》, 1981, **1**, No. 4, 335.

The static stability of optical bistability and optical stabilizer

LI CHUNFEI AND CHEN LIXUE

(*Harbin Institute of Technology*)

(Received 26 January 1984; revised 10 April 1984)

Abstract

In this paper a definition of static stability is given and the output power stability of optical bistable devices in the condition of steady operation is discussed. It is pointed out that the multi-beam interference device is better than the two-beam one in static stability and the nonlinear, especially the exponential feedback system is better than the linear one. A laser power stabilizer has been fabricated for the first time by authors using a polarization interference OBD with exponential feedback and a high static stability near 50 has been obtained. The experimental results are consistent with the calculated values.