

采用光波导调制器进行的光学 双稳态和多稳态的研究*

万立德 金恩培 邹立勋 李淳飞
(哈尔滨工业大学)

提 要

采用平面光波导电光调制器及简单的双光束干涉装置成功地进行了光学双稳态和多稳态的实验研究。光波导调制器是在自制的钛扩散铌酸锂平面光波导上蒸镀铝电极制成的。采取激光由调制器端面直接输入,由锗酸铋棱镜耦合输出的方式。实验中消除了锗酸铋晶体旋光性的影响。本文除了对光学双稳性进行了分析讨论外,还着重对不同形态的多稳实验回线进行了探讨。

一、引 言

光学双稳性的研究是激光技术出现后在非线性光学领域中的一项新课题。电光混合型光学双稳态研究首先是由 Smith 等人于 1977 年在美国贝尔实验室进行的^[1]。近年来各国科学家相继进行了各种方案的光学双稳性研究,并逐步地向波导化、集成化和实用化方向发展^[2-4]。

我们自 1979 年开始,首先利用体铌酸锂晶体等进行了几种电光混合型光学双稳态研究^[5]。从 1981 年起又采用自制的钛扩散铌酸锂平面光波导电光调制器成功地实现了对光学双稳态和多稳态的实验研究。

二、实验装置

图 1 所示装置是以光波导电光调制器为非线性器件的双光束干涉型光学双稳态和多稳态实验装置。

由稳频 He-Ne 激光器 (0.52mW) 输出的波长为 6328 \AA 的单模激光束,经可调衰减器 P_1 后,被分束器 F_1 分成两束。一束光由 20 倍显微物镜 L 会聚于光波导调制器 W 的一个端面上(此端面需进行精密抛光),细心调整后,可在光波导调制器中激励产生 TE 导模。再经锗酸铋棱镜将其耦合输出,经反射镜 M 到达分束器 F_3 ,与另一束来自 F_1 ,经初位相调制晶体 C 及分束器 F_2 的光束会合并产生等倾干涉。在实验过程中,通过改变施加

* 1982 年 5 月 7 日收到。

于位相调制晶体 C 上的直流电压值, 使该晶体的折射率随之成线性规律变化, 从而能够方便地连续调节两个相干光束间的初始位相差 ϕ_0 . 在第三节中, 将对 ϕ_0 作进一步说明.

此外, 图 1 中的 D_1 和 D_2 为光电倍增管探测器, A 为反馈电压放大器. D_1 的作用是对输入光强进行探测和放大, 其输出的电信号加到示波器 X 轴, D_2 是用来对两束相干光的相干光强进行探测和放大的. 这里称两束相干光的相干光强为输出光强. 输出光强由 D_2 探测和放大后, 转变为电信号加到示波器 Y 轴. 同时, 此电信号又经反馈放大器 A 放大后施加到光波导调制器 W 的电极上. 从而实现了输出光对输入光的反馈调制. 在示波器上便可显示出双稳回线和多稳回线.

在图 1 实验装置中, S_1 和 S_2 为光阑. 偏振器 P_3 置于 M 与 F_3 之间, 用来分取已被旋转了的线偏振光的 TE 模分量, 消除了铌酸铍棱镜旋光性的影响.

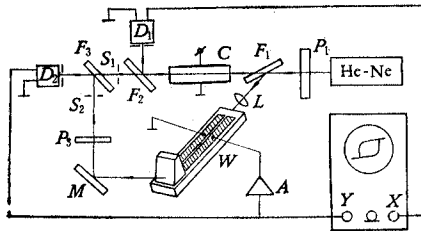


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental apparatus

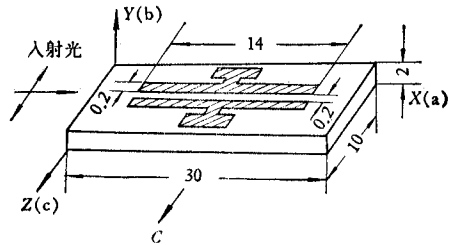


图 2 光波导电光调制器结构图

Fig. 2 Structure of the optical waveguide electro-optic modulator

实验采用的光波导电光调制器所用铌酸锂单晶是由我校单晶组控制和加工的. 选用 Y 切沿 a 轴通光的基片. 基片尺寸为 $30\text{mm} \times 2\text{mm} \times 10\text{mm}$; 电极宽度和电极间距均为 0.2mm ; 电极长度 L 为 14mm . 光波导调制器的晶体取向和几何结构见图 2.

考虑到高斯光束在平面光波导中传播时的发散作用, 为了获得有效的调制, 电极间距 d 不应小于 $d_0^{[6]}$:

$$d_0 = \left(\frac{4\lambda L}{n_e \pi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长; L 为光波导调制器电极长度; n_e 为铌酸锂晶体非寻常光折射率, $n_e = 2.20$. 采用 He-Ne 激光光源时, 可计算出此光波导调制器的电极间距最小值 d_0 为 $72\mu\text{m}$.

三、原理和实验结果

平面光波导调制器在外加调制电压作用下可对导模实现位相调制, 其原理可由耦合模理论说明. 此时, 考虑到电光晶体的各向异性, 在调制电压的微扰作用下, 平面光波导中的电磁场应服从的麦克斯韦方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\epsilon} + \delta\boldsymbol{\epsilon}) \mathbf{E}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial}{\partial t} \mu \mathbf{H}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{E} 为晶体的介电系数张量; $\delta\mathbf{E}$ 为介电系数在电压调制下的微扰变化。

可以证明^[7], 在满足平面光波导的边界条件及实验中所选取的晶体取向的情况下, 当仅有 TE 模载频输入, 亦即在 $x = 0$ 处, 仅有 TE 模的复振幅值 $A_{e0}(0)$ 分量存在时, 由于旁频相互耦合调制的结果, 在 x 距离处, 输出的 TE 模复振幅分量值 $A_e(x)$ 可表示为:

$$A_e(x) = A_{e0}(0) \cdot e^{i\phi_e}, \quad (4)$$

其中 ϕ_e 为由光波导调制器输出的 TE 模调相波的相位角。它表明在 $x = 0$ 处, 耦合输入的 TE 导模, 在光波导调制器中经 x 距离输出时, 在调制电压作用下, 由于旁频分量的相互耦合调制, 输出的 TE 模调相波的相位角变化量为 ϕ_e , 其表达式为:

$$\phi_e = |\Gamma_{ee}| \cdot |A_0| \cdot x \cdot \text{sinc} \left(\frac{\delta\beta}{2} x \right) \cdot \cos \left[\Omega t - \left(\frac{K + \Delta\beta}{2} \right) x - \phi \right], \quad (5)$$

式中 A_0 为调制电压复振幅值; ϕ 和 Ω 分别为调制电压的相位角和频率; K 为调制电压的传播常数; β 为 TE 模的传播常数; 式中引入一个符号 $\delta\beta$, 并令 $\delta\beta = K - \Delta\beta$, $\Delta\beta$ 为旁频相互耦合时引起的 TE 模传播常数的改变量。由于光波频率比调制电压频率高得多, 故 $\Delta\beta$ 可视为一常数。 Γ_{ee} 也可视为常数。

(4) 式和 (5) 式表明, 当仅有 TE 模载频输入时, 经光波导调制器后, 在调制电压作用下, 输出的为 TE 模调相波, 此即光波导电光调制器对 TE 模调相原理。

若设本实验装置的输入光强为 I_i , 由分束器 F_1 分成两束光, 而且它们是相位相同的光。一束光经调制晶体 C 后相位改变量为 ϕ_0 。另一束光经光波导调制器后与其相遇。显然, 无调制电压作用在光波导调制器时, 此两束光之间的位相差就等于 ϕ_0 , 所以称 ϕ_0 为两束相干光的初位相差。当在光波导调制器上施加调制电压时, 根据调相原理, 由光波导调制器输出的光束的相位改变量为 ϕ_e (TE 模时)。这时两束相干光相遇干涉时, 它们之间的位相差 $\Delta\phi$ 应为:

$$\Delta\phi = \phi_e - \phi_0. \quad (6)$$

若设此两束光相遇干涉时的光强分别为 $\alpha_1 I_i$ 和 $\alpha_2 I_i$, α_1 和 α_2 为比例系数。根据双光束干涉理论, 相干光强 I_t 为:

$$I_t = \alpha_1 I_i + \alpha_2 I_i + 2 \sqrt{\alpha_1 \alpha_2} I_i \cos(\phi_e - \phi_0), \quad (7)$$

式中 I_i 为此光路系统的输入光强, I_t 正是由光电倍增管探测器测得的该光路系统的输出光强。

光学系统的透射率 τ 被定义为该系统的输出光强与输入光强之比值, 故有:

$$\tau = \frac{I_t}{I_i} = \alpha(1 + M \cos \Delta\phi), \quad (8)$$

式中 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$; $M = 2\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} / \alpha_1 + \alpha_2$; 均为常数。 M 为两束光相干输出的总光强的对比度。 $\Delta\phi$ 见 (6) 式, 为两束相干光之间的位相差。显然它的大小与施加于光波导调制器上的调制电压大小有关, 也与两束相干光的初位相差 ϕ_0 有关。当 ϕ_0 取某一定值时, (8) 式便给出了光学系统的透射率 τ 与调制电压的关系, 被称为光波导调制器的调制特性。图 3 就是在示波器上显示的 TE 模传输时的光波导调制器的调制特性曲线, 所加直

流电压从 0 连续增加到 235V.

通过调制特性曲线的测量,可以求得实验所用的光波导调制器的半波电压 $V_{\pi}=48\text{V}$,一般亦可采用相同工作条件下的体铌酸锂调制器半波电压公式估算^[6]:

$$V_{\pi} = \frac{d\lambda}{n_c^3 \gamma_{33} L \xi}, \quad (9)$$

式中 γ_{33} 为铌酸锂晶体的电光系数,其值为 $30.8 \times 10^{-12}\text{m/V}$ ^[8]; n_c 为铌酸锂晶体的非寻常光折射率; λ 为 He-Ne 激光波长; d 和 L 分别为调制器的电极间距和电极长度; ξ 为考虑到电场不均匀性的修正因子,对于这种调制器一般取 ξ 为 0.7^[6]. 实验所用光波导调制器按 (9) 式计算得到: $V_{\pi} \approx 40\text{V}$, 与实测值基本接近.

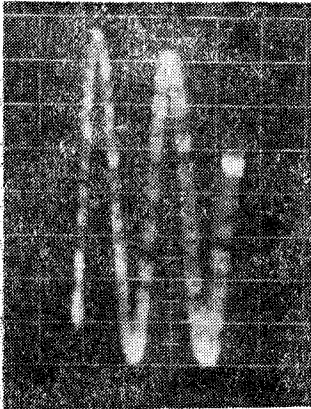


图 3 光波导调制特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of the optical waveguide modulator

由于反馈系统为一线性放大器,故由其输出的反馈电压 V 和它所探测放大的此光路系统的输出光强 I_s 成正比关系, $V \propto I_s$. 另一方面,由 (5) 式可知 TE 模调相波的相位角改变量 ϕ_c 正比于反馈电压 V . 考虑到 (6) 式,显然,当初相位 ϕ_0 为某一给定常数时,两束相干光间的位相差 $\Delta\phi$ 也正比于反馈调制电压 V ,即 $V \propto \Delta\phi$. 因此下式成立:

$$\Delta\phi = \phi_c - \phi_0 = kI_s, \quad (10)$$

式中 k 为比例常数. 根据透射率 τ 的定义有 $I_s = \tau I_i$, 代入 (10) 式可得:

$$\tau = \frac{\phi_c - \phi_0}{kI_i}. \quad (11)$$

综合考虑 (8) 式和 (11) 式便可得出如下结论: 当给定初相位 ϕ_0 为某一常数时,对应于每一个输入光强 I_i , 此光路系统可以有两个稳定的输出光强 I_s 值. 这就是光学双稳性. 在实验过程中,当连续改变输入光强 I_i 时,便可在示波器上显示出双稳回线. 当选取初相位 ϕ_0 为不同值时,可得到不同宽度的双稳回线. 图 4 给出了四种不同初相位 ϕ_0 值所对应的双稳回线.

光学双稳回线的形成也可以用解析作图法加以说明,这里不再重复^[9]. 对于光学多稳回线同样可以利用图解法予以解释.

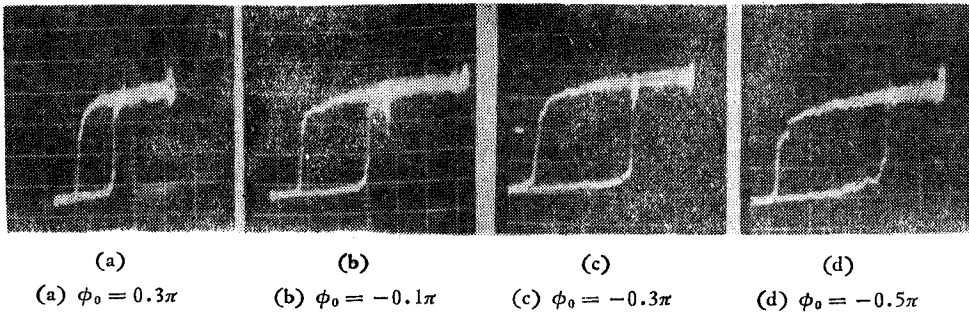
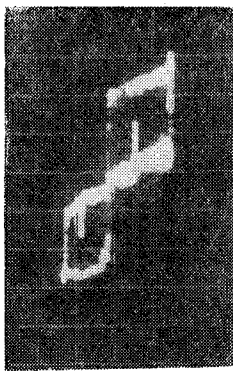


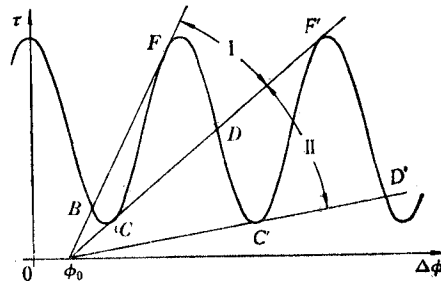
图 4 不同 ϕ_0 值的双稳回线

Fig. 4 Bistable hysteresis curves at different values of ϕ_0

在获得双稳回线的基础上,如果继续增大输入光强或反馈放大器的增益时,施加于光波导调制器的反馈电压随之增大. 这时,在示波器上便可观察到多稳回线. 如图 5(a) 就是初相位角 $\phi_0 = 0.3\pi$ 时的多稳回线. 当 ϕ_0 取某一定值时,根据 (8) 式可以作出 $\tau-\Delta\phi$ 调制特性曲线. 与此同时,根据 (11) 式又可作出 $\tau-\Delta\phi$ 线性反馈线. 后者为一组直线,它们在横坐标轴上的交点为初相位差 ϕ_0 . 反馈线的斜率随着反馈电压的增加而减小. 反馈线与调制特性曲线的交点正是此光路系统可能存在的状态,如图 5(b). 因此,当出现反馈线与调制特性曲线的一个周期相交时可获得双稳回线^[9]. 当反馈电压足够高而使反馈线下倾到与调制特性曲线的几个周期相交时,便可出现多稳回线. 图 5(a) 所示情况相当两级双稳回线串接. 这可由图 5(b) 说明. 这是当 ϕ_0 为 0.3π 时所出现的一种特殊情况. 通过第一级双稳的上跳点 C (下切点) 的反馈直线恰好同时通过第二级双稳的下跳点 F' (上切点),亦即两者对应于同一入射光强,呈现出两个双稳回线相接于一点的多稳回线.



(a)



(b)

图 5 $\phi = 0.3\pi$ 时的多稳回线

(a) 照片 (b) 解析图

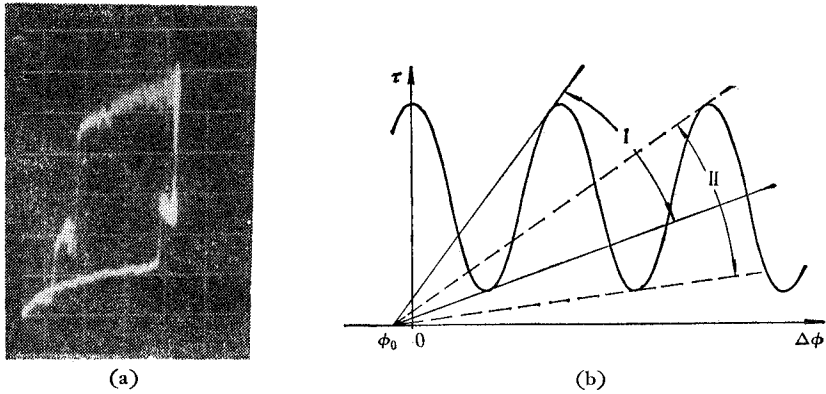
Fig. 5 Multistable hysteresis curve at $\phi_0 = 0.3\pi$

(a) Photograph (b) Graph

一般多稳态回线如图 6(a) 所示,此时 ϕ_0 为 -0.1π . 其图解法分析见图 6(b). 在这种情况下,第一级双稳的上跳点与第二级双稳的下跳点与不同斜率的反馈直线相切,表明它们分别对应于不同的入射光强. 在图 6(b) 中,反馈直线变化区间 I 和区间 II 分别对应于第一级双稳和第二级双稳回线. 由于两个变化区间出现交迭,故使得两个双稳回线在一段入射光强范围内串接. 这是最常见的三个稳态的情况.

当继续提高反馈电压时,我们获得了具有四个稳态的三级双稳相接的回线,其照片如图 7(a). 机理可用图 7(b) 分析说明. 这时,对应于三级双稳的反馈直线变化区间分别为 I, II, III 区间. 由于 I 与 II 区间交迭,II 与 III 区间交迭,故为三级双稳回线重迭串接形式的多稳回线. 由于此时输入光强较大,超过了探测放大器的线性范围,故多稳回线的失真较大.

光学双稳性和多稳性的研究在实用上和理论上都具有重要意义. 早在 1978 年 Smith 等人^[4]就曾系统地阐述了电光混合型光学双稳性和多稳性的多种功能,如光开关,光存储器,脉冲整形器,光限幅器,光三极管及多级光逻辑元件等. 混合型集成双稳器件具有功

图 6 $\phi_0 = -0.1\pi$ 时的多稳回线

(a) 照片 (b) 解析图

Fig. 6 Multistable hysteresis curve at $\phi_0 = -0.1\pi$

(a) Photograph (b) Graph

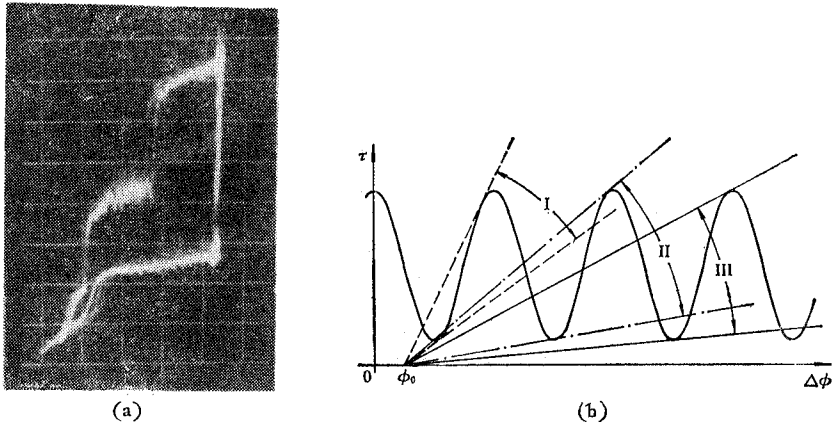


图 7 四稳态回线

(a) 照片 (b) 解析图

Fig. 7 Four-Stable hysteresis curve

(a) Photograph (b) Graph

耗小,既可用光激励又可用电激励,可多模运用等特点,有可能在目前多模光通讯系统及光电混合式信息处理中得到应用。

本项工作得到于荣金、张月清、李玉善、金锋、林盛强、曹泽煌、徐玉恒、张儒、孟庆岫、汤有华等同志的大力支持;洪晶教授自始至终给予热情指导并审阅了全文;在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] P. W. Smith, E. H. Turner et al., IEEE J. Quant. Elec. **QE-14** (1978), 207.
- [2] P. W. Smith, Appl. Phys. Lett., **34**(1979), 62.
- [3] P. S. Cross, IEEE J. Quant. Elec., **QE-14**(1978), 577.
- [4] A. Schnappor, Opt. Comm., **29**(1979), 304.

- [5] 李淳飞、邹立勋、万立德，哈尔滨工业大学学报，1982年，第1期，第1—12页。
- [6] I. P. Kaminov, *Appl. Phys. Lett.*, **22**(1973), 540.
- [7] 叶培大、吴舜尊，光波导技术基本理论，人民邮电出版社，1981年，第502页。
- [8] 土井康弘，偏光と结晶光学，共立出版株式会社，1975年，第110页。
- [9] 李淳飞、季家镛，光学学报，**4** (1981)，336。

STUDY OF OPTICAL BISTABILITY AND MULTISTABILITY WITH OPTICAL WAVEGUIDE MODULATOR

Wan Li-de, Jin En-pei, Zou Li-xun, Li Chun-fei

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology)

Using a planar optical waveguide electro-optic modulator and simple double beam interfering device, the experimental study of optical bistability and multistability is successfully performed. The waveguide modulator is made by depositing Aluminium as electrodes on the Ti-diffused LiNbO₃ planar optical waveguide which is fabricated by ourselves. Laser beam is coupled directly into the end of optical waveguide modulator and out of the Bi₁₂GeO₂₀ prism. Optical rotation arising from Bi₁₂GeO₂₀ crystal is overcome in experiment. In addition to analyzing and discussing optical bistability the multistabilital hysteresis curves of different shapes obtained in experiments are particularly investigated.