

对薄膜型光双稳器件 (BOD) 的比较与研究

孙德贵 翁兆恒 杨树梅

(应用光学国家重点实验室)

摘要: 我们比较和研究了计算非线性干涉滤光片双稳器件 (BOD) 的三个理论公式, 论证了用建立在薄膜光学原理上的矩阵公式研究和设计薄膜光双稳器件的必要性, 计算了光双稳器件的几个重要参数 ΔI_b , ΔI_c , 和 I_0 与初始失调量 δ 之间的关系, 并描绘了其关系曲线, 对设计和计算薄膜光双稳器件有很重要的意义。为使我们的计算和设计更加严密, 我们引入色散关系, 使其具有自洽性。

一、引言

干涉滤光片 BOD 与一个 $F-P$ 腔相类似, 在一定条件下, 可以用 $F-P$ 腔公式计算和研究^[1-6]。在一些文章中, 导致非线性薄膜折射率变化的热源只来源于干涉滤光片的中心层, 而两侧反射层所引起的非线性变化认为是可以忽略的。然而, 文献^[1]在对干涉滤光片双稳器件的中心层和反射层对稳性的影响进行了细致的研究, 充分肯定了反射层对非线性的贡献, 也就是说, 干涉滤光片产生的非线性来源于中心层和反射层所共同吸收的热量。其实已经有人对干涉滤光片的各反射层之间的特性进行过详细研究^[6], 研究结果也是可以说明了产生薄膜非线性的来源应属于中心层和反射层二者的共同作用。在很多系统的设计中, 有时并不需要研究其物理过程, 而只考虑最终结果。所以, 基于这一点, 我们在比较了三个计算公式, 确定用精确的矩阵公式计算和研究薄膜光双稳器件之后, 认真研究了用于设计和评价光双稳性的三个重要参数 ΔI_b 、 ΔI_c 、 I_0 与产生光双稳失调量 δ 的关系。

二、三个公式的比较

对稳型干涉滤光片具有一个通用的形式: $(HL)^p (HH)^m (LH)^q$, 其中 H 代表四分之一波长 ($\lambda/4$) 厚度的高折射率层 (ZnSe), L 代表四分之一波长厚度的低折射率层 (Na_3AlF_6), p 和 m 都是整数。对这一领域的研究先后出现了三个基本的计算公式 (1) — (3)。显然 (1), (2) 公式都是把干涉滤光片双稳器件看成与 $F-P$ 腔等效的条件下建立起来, 而 (3) 是用薄膜光学原理建立起来的。严格来讲, 在非线性的条件下干涉滤光片是一个动态的 $F-P$ 腔, 所以用线性条件研究光双稳过程是不精确的。

$$\tau = a (1 - R)^2 / [(1 - R \cdot a)^2 (1 + F \sin^2 \phi)] \quad (1)$$

$$\tau = [a(1 - R)]^2 / \{[(1 - R \cdot a)^2 + 1][1 + F \sin^2 \phi]\} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^{4p+1} \begin{pmatrix} \cos \delta_j & (i/\eta_j) \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_0 \end{pmatrix} \quad (3a)$$

$$\tau = \frac{4\eta_0\eta_s}{B\eta_0 + C} (B\eta_0 + C) \quad (3b)$$

$$\delta_j = (2\pi/\lambda) \cdot L_j \cdot \eta_j \quad (3c)$$

其中, $a = \exp(-\alpha L)$ α 是吸收系数, ϕ 是中心层的单程位相变化, λ 是激光波长. R 是反射层的反射率, 由公式 (4) 来计算.

$$R = \left| \frac{n_0 n_H^{2p} - n_s n_L^{2p}}{n_0 n_H^{2p} + n_s n_L^{2p}} \right|^2 \quad (4)$$

η_j 是光学导纳, n_0 和 n_s 分别是空气和基底玻璃的折射率, n_H 和 n_L 分别是高、低薄膜层的折射率, L_j 是第 j 层膜的物理厚度.

我们取 $\lambda = 514\text{nm}$ 的波长, ZnSe 的吸收系数 $\alpha = 600\text{cm}^{-1}$, $\delta = 4.4\text{nm}$, $p = 3$, $m = 4$ 于是有: $\phi(I_s) = m\pi + \Delta n \cdot 2\pi / (\lambda - \delta)$ (5)

ZnSe 的非线性近似公式为: (6)

$$n(I_s) = n_0 + n_2 I_s \quad (6)$$

其中 n_2 是以 cm^2/m 计算的常数, 称为非线性系数, I_s 是薄膜中的激光强度. 虽然, 严格说 $n(I_s)$ 不是 I_s 的线性函数, 但近似取为线性是不影响我们考虑问题. 我们取 $n_0 = 2.7$, 由三个公式计算得到的垂直入射光双稳曲线分别如图 1 中曲线 1, 2, 3. 在 10° 入射角时的光双稳曲线分别如图 2 中的曲线 1, 2, 3. 从图 1、2 中可以看出, 用三个不同的公式计算得到的光双稳曲线有很大的不同. 因此, 对于非线性光双稳这样一个动态过程, 用精确的薄膜光学原理公式 (3) 是非常必要的.

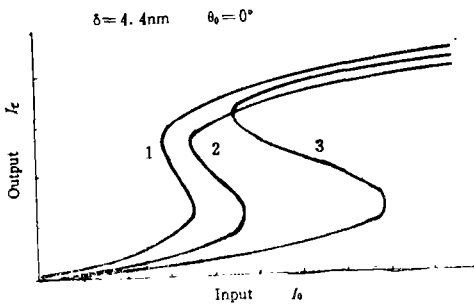


Fig. 1 Input/output characteristics of BODs: Line 1 is calculated from formula 1; line 2 from formula 2; line 3 from formula 3, $p = 3$, $m = 4$, $\delta = 4.4\text{nm}$, $\theta = 0^\circ$

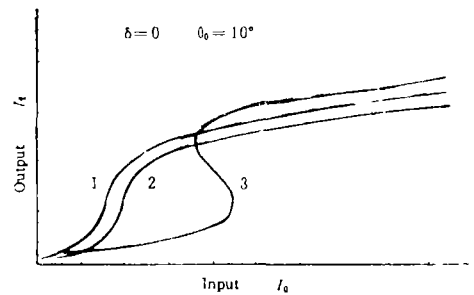


Fig. 2 Input/output characteristics of BODs: line 1 was calculated from formula 1; line 2 from formula 2; line 3 from formula 3, $p = 3$, $m = 4$, $\delta = 0$, $\theta = 10^\circ$

三、结构设计及色散关系的引入

我们知道，描绘BOD光双稳性能的主要几个参数，如图3所示。 $I_0\uparrow$ 是开启光强， $I_0\downarrow$ 是关闭光强， $\Delta I_0 = I_0\uparrow - I_0\downarrow$ 代表光双稳性的宽度，还有与它们相对应的 $I_t\uparrow$ ， $I_t\downarrow$ 及 $\Delta I_t = I_t\downarrow - I_t\uparrow$ ，这些参数在设计BOD时都是很重要的。

初始失调量 δ 其实是偏离诱导非线性的激光波长 λ_0 时，在弱光条件下的四分之一波长的光学厚度与四分之一激光波长的距离，是产生光双稳的条件。我们用公式(3)和(6)相结合描绘出了几个典型结构的 $I_0\uparrow$ ， ΔI_0 ， ΔI_t 与 δ 的关系曲线，如图4所示。这些结构分别具有不同的中心层厚度和反射层的层数。这样，我们可以根据不同的实验和应用的需要在图4中选择比较理想的结构。

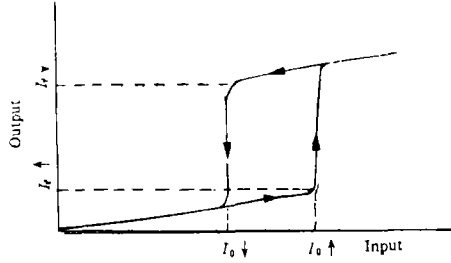


Fig. 3. The major parameters of a BOD: $I_0\uparrow$; $\delta I_0 = I_0\uparrow - I_0\downarrow$; $\delta I_t = I_t\downarrow - I_t\uparrow$

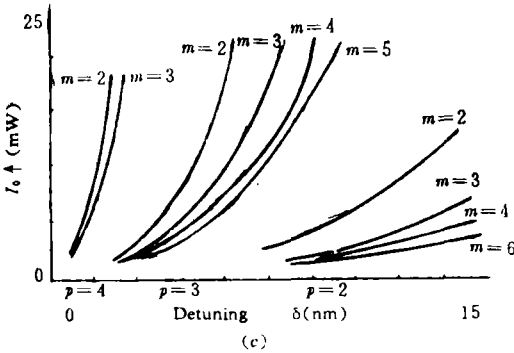
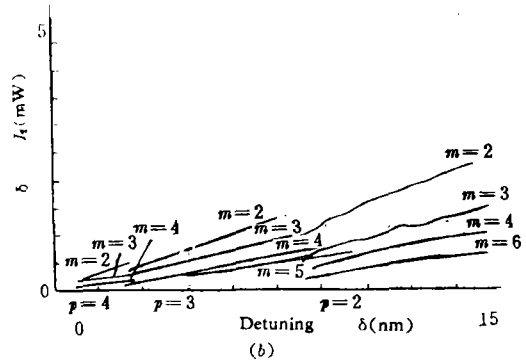
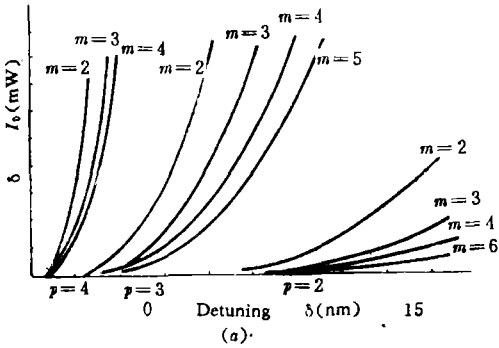


Fig. 4. Relation curves of parameters with detuning δ : (a) for δI_0 ; (b) for δI_t , and (c) for $I_0\uparrow$

从图4中，一个有意义的发现是，反射层直接影响产生光双稳的临界失调量 δ_c 。

要确定一个精确的 δ 值以产生光双稳现象，是一个值得认真考虑的问题，因为要有 δ 值，就相当于在弱光情况下，BOD的透射峰值波长 λ 在诱导非线性的激光波长 λ_0 。之前($\lambda' < \lambda_0$)，保证在光强增加时，折射率增加使 λ' 向 λ_0 靠近最后发生谐振产生光双稳现象。然而，非线性薄膜ZnSe是色散性的，在 $\lambda' \neq \lambda_0$ 时，镀膜是按 λ' 的干涉最大的原理，而 λ' 时的

折射率 n' 也不等于 2.7。为精确地按 δ 的要求计算出理想的 λ' 值, 我们引入了色散关系 (7)^[10], 这样就使我们的设计方法具有自洽性。

$$n'^2 = 3.71 + \frac{2.19\lambda'^2}{\lambda'^2 - 0.105} \quad (7)$$

其中 $\lambda' = 4n'L$ (以 μm 计算), λ' 是镀膜波长, L 是满足 δ 值的一层薄膜的物理厚度。如果中心层为 2m 层, 则有:

$$L = \frac{1}{n_{H_0}} \left(\frac{\lambda_0}{4} - \frac{\delta}{2m} \right) \quad (8)$$

n_{H_0} 是 ZnSe 在 514nm 波长处的折射率。如果取 $\delta = 4.4\text{nm}$, $m = 4$, $\lambda = 514\text{nm}$, $n_{H_0} = 2.7$, 得: $L = 47.4\text{nm}$, $n' = 2.7117$, 最后得 $\lambda' \approx 513\text{nm}$ 。

四、结 束 语

我们通过对计算薄膜型光双稳器件的三个公式, 确定了用精确的薄膜光学原理公式的必要性。研究了如描绘光双稳器件的几个主要参数 ΔI_0 , ΔI , $I_0 \uparrow$ 与失调量 δ 的关系, 这个关系曲线包括几个比较典型的结构, 为计算和设计薄膜型光双稳器件提供了可靠的依据。为了精确地计算镀膜波长 λ' , 我们把薄膜的色散关系引入到我们的方法中, 使我们的方法具有很好自洽性。

参 考 文 献

- [1] S. D. Smith et al., Cont. Commun., 51(5), 357-362 (1984)
- [2] G. R. Clbright et al., Appl. Opt. Lett., 45 (10), 1031-1033 (1974)
- [3] R. J. Harris et al., Appl. Opt., 16(2), 436-438 (1987)
- [4] H. A. 麦克劳德等著, (周九林等译), 《薄膜光学技术》, 国防工业出版社, 1974
- [5] Y. T. Chan et al., J. Opt. Soc. Am., B3 (11), 1535-1539 (1986)
- [6] E. Abraham et al., J. Opt. Soc. Am., B4(4), 490-497 (1987)
- [7] B. S. Uherelt. et al., J. Opt. Soc. Am., B3(2), 351-362 (1986)
- [8] De-Gun Sun et al., Annual Meeting '89 of OSA, ML44
- [9] U. Olin, J. Opt. Soc. Am., B7 (1), 35 (1990)
- [10] H.H. Li, J. Phy. Chem. Ref. Data, 13 (1), 103 (1984)

Comparing and Studying for Three Calculating Formulas of Bistable Optical Devices (BODs)

Sun Degui, Weng Zhaoheng and Yang Shumei

Abstract

In this paper, we discuss and compare three formulas for calculating and studying the bistable characteristics of bistable optical devices

(BODs). Then we confirm the necessity to study optical bistabilities of BODs using accuracy matrix formulas based on film optical principles. We calculate some important relationships of BODs, and introduce the dispersive relation of nonlinear material (ZnSe) which makes our method more self-consistent.