

棱镜非线性波导耦合光学双稳理论

马少杰 于荣金 刘立杰

(中国科学院长春物理研究所)

1990年4月14日收到

摘 要

利用菲涅耳公式计算了棱镜非线性光波导耦合。从理论上分析了该双稳器件的调制和反馈特性,模拟出不同偏置角的光学双稳曲线,能定量地分析双稳最小偏置角,双稳阈值功率等。

一、引 言

光学双稳思想最先是根据FP腔结构提出的^[1,2]。但是因为高Q值FP腔有关的渡越时间限制了光学双稳的响应时间,所以人们又不断地寻找新结构来提高光学双稳器件的性能。最近几年,人们先后发现表面等离子体激元波衰减全反射^[3],非线性分布耦合(棱镜,光栅等)^[4],非线性波导之间耦合^[5]等新结构具有良好的光学反馈和调制特性,是理想的光学双稳器件。利用这些新结构可使光双稳态的性能得到很大改进。

棱镜耦合光学双稳器件是近几年提出的新结构之一。实验中发现,当光波导、衬底或覆盖层是非线性介质时,可产生光开关和光双稳^[4,6,7]。并且从理论上分析了当衬底或(和)覆盖层是非线性介质时器件的双稳特性^[8,9],但是还没有完满解释当波导为非线性介质时的光学双稳态。

本文利用菲涅耳公式计算棱镜非线性光波导耦合问题,分别讨论了棱镜非线性波导耦合的光调制和光反馈,偏置角对光双稳理论曲线的影响,并定量地给出产生光学双稳的最小偏置角和双稳阈值。

二、理论分析

当一束TE偏振光照射到界面上时,被界面反射一部分光。反射光的振幅可由菲涅耳公式求出^[10]:

$$\frac{E^{(r)}}{E^{(i)}} = r_{ij} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_j \cos \theta_j}{n_i \cos \theta_i + n_j \cos \theta_j} \quad (1)$$

式中 r_{ij} 是界面 $i-j$ 的反射系数, n_i 是介质的折射率, θ_i 是光线与界面法线之间的夹角。

当光线照射到一均匀介质薄膜(如图1所示),膜层可等效为界面的反射,等效的反射系数为:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(i2K_2 h)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(i2K_2 h)} \quad (2)$$

式中 $K_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 \cos\theta_2$ 。多层介质的反射系数可用递推法求出。

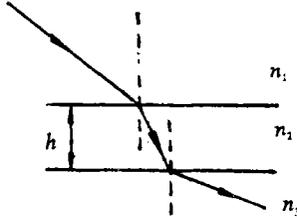


图1 光束通过单层均匀介质薄膜的传播
Fig.1 Propagation of a light beam through a homogeneous dielectric film.

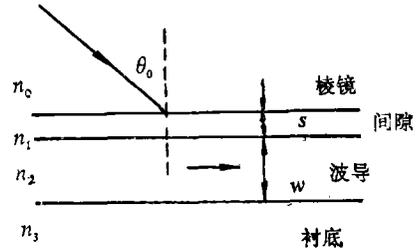


图2 棱镜非线性波导耦合器示意图
Fig.2 Schematic diagram of prism nonlinear waveguide coupler.

图2所示为棱镜非线性波导耦合示意图。设 $n_0 > n_2 > n_3 > n_1$ ，其中 n_2 是非线性介质， $n_2 = n_{20} + n_{2E} I_E$ ， I_E 是波导中的传输光强。其它材料为线性光学材料。当一束低功率入射光照射到棱镜底面时， $n_2 \approx n_{20}$ ，可用菲涅耳反射系数递推法求出整个系统的反射系数：

$$r_{0123} = \frac{r_{01} + r_{123} \exp(i2K_1 s)}{1 + r_{01} r_{123} \exp(i2K_1 s)} \quad (3)$$

式中 $r_{123} = [r_{12} + r_{23} \exp(i2K_2 w)] / [1 + r_{12} r_{23} \exp(i2K_2 w)]$ ， r_{01} ， r_{12} ， r_{23} 是单层界面TE偏振光的菲涅耳反射系数， K_1 ， K_2 是波矢量的垂直分量： $K_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 \cos\theta_1$ ，

$K_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 \cos\theta_2$ ， s ， w 分别为间隙和波导厚度。光束由棱镜底面反射的反射率为：

$$R = |r_{0123}|^2 \quad (4)$$

用计算机绘出低功率入射时的反射率曲线如图3所示。表1给出计算中代入的参

表1 棱镜非线性波导耦合器参数
Table 1 Device parameters of prism nonlinear waveguide coupler.

$n_0 = 1.751$	$n_3 = 1.523$
$n_1 = 1.000$	$s = 100\text{nm}$
$n_{20} = 1.527$	$w = 140\text{nm}$
$n_{2E} = 10^{-14} \text{m}^2/\text{W}$	$\lambda_0 = 600\text{nm}$

量。由反射定律可知：当入射角 θ_0 大于临界角 $[\theta_c = \sin^{-1}(n_1/n_0) = 34.8^\circ]$ 时，入射光被全部反射，但由于消逝场的作用，总有一些光漏泄到光波导。当入射角 $\theta_0 \sim 60.424^\circ$ 时，大部分入射光通过消逝场耦合进入光波导。由能量守恒定律可得：当 $\theta_0 > \theta_c$ 时，棱镜波导间的光束耦合效率为：

$$\eta = 1 - R = 1 - |r_{0123}|^2 \quad (5)$$

以上讨论低功率入射光入射情况。当入射光强增加时，波导中的光强也随之增加。因为波导是非线性介质，其折射率是波导中光强的函数，所以当入射光强增加时引起波导折射率变化，导致耦合效率的改变。可见棱镜非线性光波导间耦合具有光学反馈和调制作用，调制和反馈函数分别为：

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - |r_{0123}(I_g)|^2 \\ \eta &= I_g / I_i \end{aligned} \quad (6)$$

该系统是线性反馈系统。

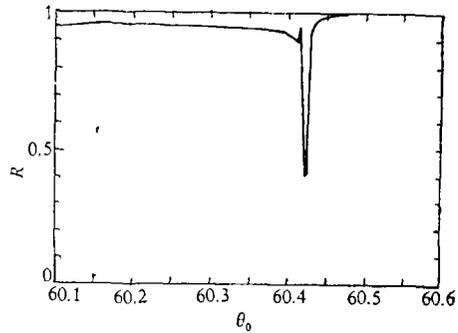


图3 由棱镜底面反射的反射率曲线
Fig.3 Reflectivity curve from bottom surface of the prism.

三、计算结果

图4是偏置角为0.76'时，由计算机绘出的调制和反馈曲线(其它参数由表1给出)。由图4可以看到，当入射光强增加时反馈曲线的斜率由大变小。最初反馈曲线与调制曲线有一个交点A，交点的反馈曲线斜率大于调制曲线斜率，所以是稳定的。但当入射光强增加到一定值时，反馈曲线与调制曲线有三个交点C, I, G。其中I点反馈曲线斜率小于调制曲线的斜率，因此该点不稳定，其它二点C, G是稳定的，此时为对应一定入射光强的两个稳态输出光强。

当连续增加入射光强 I_i ，工作点将沿A→B→C→D→E→F变化，在D→E处发生由低态向高态的跳跃。反之，若连续减小输入光强 I_i ，工作点沿F→E→G→H→B→A变化，在H→B处发生由高态向低态的跳跃。

图5是计算机模拟出在各种不同偏置角下 I_0 随 I_i 变化的曲线。当偏置角 $\Delta\theta$ 小于0.18'时，输出光强产生光学开关效应；当 $\Delta\theta$ 大于0.18'时，输出光强产生光学双稳态。

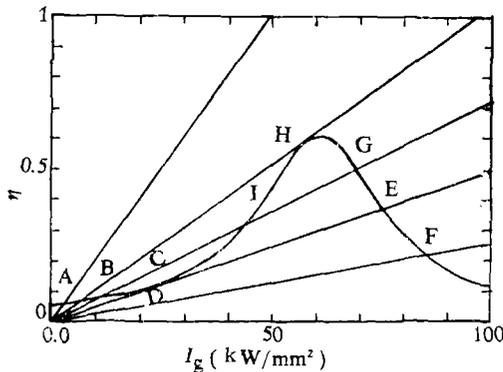


图4 棱镜非线性波导耦合的调制和反馈曲线
Fig.4 Modulation and feedback curves of the prism nonlinear waveguide coupler.

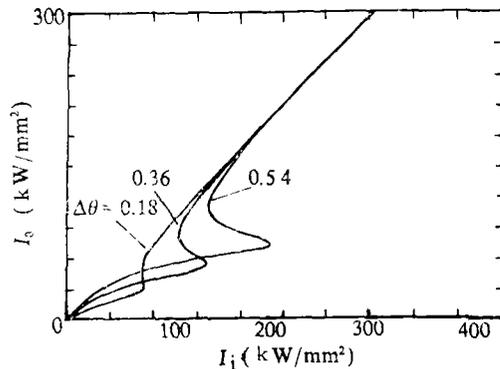


图5 棱镜非线性波导耦合双稳理论曲线
Fig.5 Theoretical curves of optical bistability of the prism nonlinear waveguide coupler.

双稳阈值可由图 5 坐标求出。随偏置角增加双稳曲线变宽, 双稳阈值也相应增加。

四、结 论

由以上的计算可知, 利用菲涅耳公式可以求解棱镜非线性波导之间光束耦合问题。并且可以分析棱镜非线性波导耦合的光学调制和光学反馈, 可模拟出双稳理论曲线, 定量地讨论在不同偏置角下产生的光开关和光学双稳态现象, 以及产生光双稳的阈值功率和最小偏置角。

参 考 文 献

- [1] A. Szöke, V. Dancu, J. Goldhar, and N. A. Kurnit, *Phys. Lett.*, 5, 376(1969).
- [2] S. L. McCall, H. M. Gibbs, and T. N. C. Venkatesan, *J. Opt. Soc. Am.*, 65, 1184(1975).
- [3] P. Martinot, A. Koster, and S. Laval, *IEEE J. Quantum Electron.*, 21, 1140(1985).
刘立杰, 于荣金, 赵伟, 第三届全国纤维光学与集成光学学术交流会, 第二届全国光计算技术研讨会论文集 E1, 292(1988).
- [4] G. Assanto, B. Svensson, D. Kuchibhatla, U. J. Gibson, C. T. Seaton, and G. I. Stegeman, *Opt. Lett.*, 11, 644(1986).
- [5] D. Sarid, *Opt. Lett.*, 6, 552(1981).
- [6] P. Dannberg and E. Broese, *Appl. Opt.*, 27, 1612(1988).
- [7] J. D. Valera, B. Svensson, C. T. Seaton, and G. I. Stegeman, *Appl. Phys. Lett.*, 48, 573(1986).
- [8] V. J. Montemayor and R. T. Deck, *J. Opt. Soc. Am. B.*, 3, 1211(1986).
- [9] 李敏英, 李淳飞, 第四届集成光学学术交流会论文集, 102(1987).
- [10] M. 玻恩, E. 沃耳夫, 光学原理, 上册, p.62(1978).

THEORY OF OPTICAL BISTABILITY OF PRISM NONLINEAR WAVEGUIDE COUPLING

Ma Shaojie Yu Rongjin Liu Lijie
(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

Received 14 April 1990

Abstract

The bistable behavior originating from optical nonlinear coupling between a prism and a nonlinear waveguide by using Fresnel formulas is described. Modulation and feedback curves of the optical bistable device are analyzed. Optical bistable curves at different offset angles are calculated. The results show that the smallest offset angle and threshold of the device can be determined by using this method.

In prism nonlinear waveguide coupling system, as shown in Fig.2, assuming prism the index of refraction $n_0 = 1.751$, gap (air) $s = 100\text{nm}$

and its index of refraction $n_1 = 1.000$, waveguide thickness $w = 1400\text{nm}$ and its index of refraction $n_2 = n_{20} + n_{2E}I_s = 1.527 + 10^{-14}\text{m}^2/\text{W}$, substrate index of refraction offset angles (values of the angle shift from the incidence coupling angle) are calculated. If the offset angle $\Delta\theta < 0.18'$, optical switch occurs. If the offset angle $\Delta\theta > 0.18'$, optical bistable operation occurs. And the hysteresis cycle width and threshold power increase with the increase of offset angle.