

# 掺铒光纤光栅的开关动力学特征研究

刘军民\* 徐文成 廖常俊 刘颂豪

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510631)

**摘 要** 研究在连续光入射下掺铒光纤光栅的开关动力学特征, 发展其开关过程有类似于相变的特征。数值结果表明, 主动光纤光栅在连续光条件下更适合于脉冲串产生。

**关键词** 掺铒光纤光栅, 光开关。

## 1 引 言

作为一种可能的全光开关器件, 非线性周期结构引起了很大的兴趣。如果不考虑非线性效应, 周期结构存在禁带和导带。当入射光波长处于禁带内时, 其在周期结构内的传输是指指数衰减的。如果非线性克尔效应介入时, 情况变得很复杂。此时周期结构的透过率与入射光的功率有关, 对于处于禁带内的光, 会出现双稳态<sup>[1]</sup>。考虑开关过程的时间演化(即动力学过程), 数值结果表明, 仅用双稳态不能完全描述这种开关的动力学特征, 在一定条件下, 双稳态的高透过率状态是不稳定的, 会出现自振荡和混沌现象<sup>[2]</sup>。仅从光开关应用的角度来考虑, 这是不利的一面, 但是自振荡效应本身提供了一种产生脉冲串的方法。

光纤光栅作为一种非线性周期结构, 有很突出的优点: 1) 目前紫外线在掺 GeO<sub>2</sub> 玻璃光纤上可以“刻”任意周期常数的光栅<sup>[3]</sup>; 2) 由于很小的纤芯, 使在较低的功率下产生较大的非线性效应。这样, 用光纤光栅来研究非线性周期结构的特性在实验上更容易实现。目前的理论和实验<sup>[4]</sup>都是研究被动非线性周期结构, 如果在脉冲光进行开关的条件下, 输出信号总是要损失能量的。在此背景下, 本文提出和研究了主动光纤光栅——掺铒光纤光栅在连续光入射下的开关动力学特征。

## 2 基本理论

设无损耗单模光纤中有如下的折射率微扰

$$n = n_0 + n_1 \cos(2\pi z/\Lambda)$$

$n_1 \ll n_0$ ,  $n_0$  为未扰动光纤的折射率,  $\Lambda$  为微扰的空间周期。在这种结构中传输的电场可以分解为前向和后向波

$$E = \{E_+(z, t) \exp[i(\beta_0 z - \omega t)] + E_-(z, t) \exp[-i(\beta_0 z + \omega t)]\} F(x, y)$$

\* 中国科学技术大学博士生。

收稿日期: 1995年1月7日; 收到修改稿日期: 1995年6月12日

$E_+$  和  $E_-$  分别为前向和后向传输电场的包络,  $\beta_0$  为未扰动光纤中的传输常数,  $\omega$  为载波频率,  $F(x, y)$  为传输模式的横向分布。在慢变包络近似下, 采用旋转坐标系, 耦合模理论可以给出  $E_+$ 、 $E_-$  在掺铒光纤光栅中的传输满足如下方程<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} i\left(\frac{dE_+}{dz} + \frac{1}{v} \frac{dE_+}{dt}\right) + kE_- + \delta E_+ - i\alpha E_+ + \Gamma(|E_+|^2 + 2|E_-|^2)E_+ &= 0 \\ i\left(-\frac{dE_-}{dz} + \frac{1}{v} \frac{dE_-}{dt}\right) + kE_+ + \delta E_- - i\alpha E_- + \Gamma(|E_-|^2 + 2|E_+|^2)E_- &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $v$  为群速度,  $k = \pi n_1/\lambda$  为耦合系数,  $\Gamma$  为非线性系数,  $\delta = \beta_0 - \beta_B$ ,  $\beta_B = \pi/\Lambda$ 。  $\alpha$  为增益系数。在这个耦合方程中作了两个近似: 第一是忽略了材料色散和波导色散, 因为线性周期结构提供了一个大得多的群速率色散<sup>[6]</sup>, 群速度色散的正负可以通过调节  $\delta$  来选择; 第二, 入射光的带宽远小于增益带宽, 并且载波频率位于增益频带的中心。对于三价铒离子, 其增益带宽约为 26 nm, 皮秒脉冲或更长脉冲满足此条件。

对于有限长光纤光栅, 边界条件和初始条件设为:

$$E_+(0, t) = A(t), \quad E_-(L, t) = 0, \quad E_+(z, 0) = E_-(z, 0) = 0,$$

其中  $L$  为光纤光栅的长度。在此条件下, 方程(1)没有解析解。

对于没有增益的情况 ( $\alpha = 0$ ), 已经有文献讨论其在连续光入射下的开关动力学特征, 发现自振荡和混沌效应的条件<sup>[2]</sup>:

1) 当输入功率恰好为发生双稳跃迁(从低透过率到高透过率)的临界功率  $P_0$  时,  $\delta$  小于某一与  $k$  有关的常数  $\delta_c$  时则发生自振荡。进一步减小  $\delta$ , 则产生混沌。对于光开关操作, 必须在输入功率足以产生双稳跃迁时避免自振荡和混沌, 因此开关条件为  $k > \delta > \delta_c$ 。

2) 输入功率  $P$  大于某一与  $\delta$ 、 $k$  有关的常数  $P_c$ , 则不论  $\delta$  是否小于  $\delta_c$ , 都出现自振荡。如果输入功率足够大, 则出现混沌现象。这样, 开关条件为  $P < P_c$ , 同时  $k > \delta > \delta_c$ 。

1)和 2)是数值结果。数值分析表明开关过程与一种能量密度波包(类似于无限长光纤光栅中的空间孤立波)的激发有关。如果能量密度波包是运动的, 则此能量密度波包在光纤光栅中不断地被激发、运动、然后在输出端损失能量形成自振荡输出; 如果能量密度波包是静止的, 则在输出端形成一稳定的输出。de Sterke<sup>[2]</sup> 通过数值方法发现, 能量密度波包是否运动, 取决于能量密度波包的空间宽度, 当能量密度波包的空间宽度约小于光纤光栅长度的一半时, 能量密度波包是运动的, 从而形成自振荡现象。

对于增益  $\alpha \neq 0$  的情况, 分析其动力学特征只能采用数值方法。数值计算采用有限差分法, 沿着方程(1)的特征积分<sup>[7]</sup>。在以下的计算中, 时间单位取为  $L/v$ 。

### 3 掺铒非线性光纤光栅的开关动力学特征

对于方程(1), 非线性折射率系数的大小(只要不为零)并不影响所描写的物理过程的本质, 即使对于极小的非线性折射率系数, 足够大的功率同样可以观察到所有非线性效应引起的物理现象。因此, 不失一般性, 可以设非线性折射率系数  $\Gamma = 0.1$ , 对于实际的非线性折射率系数, 很容易得到实验室中相应的功率。在以下的计算中, 取光纤光栅长度  $L$  为 1 m, 考虑到方程(1)具有标度不变的特点, 对其它长度的物理过程可以通过标度变换来得到。通常, 用紫外线“刻”的光纤光栅,  $n_1$  约为  $10^{-6}$ , 设入射光波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 则  $k \approx 2 \text{ m}^{-1}$ , 因此取  $k = 2 \text{ m}^{-1}$ 。以下采用无量纲参数, 即作变换  $z/L \sim z$ ,  $kL \sim k$ ,  $\delta L \sim \delta$ ,  $\alpha L \sim \alpha$ 。

数值计算发现,  $P_0$ 、 $P_c$ 、 $\delta_c$  与增益系数  $\alpha$  有关。掺铒非线性光纤光栅的开关动力学的主要特征就是由  $P_0$ 、 $P_c$ 、 $\delta_c$  所表征的, 具体为:

1)  $\delta_c$  随  $\alpha$  的增加而增加。对  $k=2$ , 当  $\alpha=1 \pm 0.01$  时,  $\delta_c=k$ , 如图 1 所示。按照第二节 1) 的分析, 能够实现开关的  $\delta$  的变动范围随着  $\alpha$  的增加而减小, 当增益系数  $\alpha > 1$  时, 掺铒光纤光栅不能作为连续光开关使用。这样, 对于大增益系数, 掺铒光纤光栅用于产生脉冲串较为理想。

2) 当  $k$  和  $\delta$  一定时,  $P_0$  和  $P_c$  则随  $\alpha$  的增加而减小。 $P_c$  的下降速度比  $P_0$  的快。在输入功率-增益系数相空间( $P, \alpha$ ) 上, 可以划分出三个区域分别对应于低透过率区域(I)、高透过率稳定区域(II)和自振荡区域(III)。图 2 给出在  $k=2$  和  $\delta=1.5$  时的相图。这个相图上, 存在一个特殊的临界点  $A(1.90 \pm 0.01, 0.44 \pm 0.01)$ 。当  $\alpha > 0.44$  时, 高透过率状态是自振荡的, 对  $\alpha < 0.44$ , 高透过率状态可以稳态的(阻尼振荡)也可以是自振荡的, 由输入功率是否大于  $P_c$  决定。因此, 在  $k=2$  和  $\delta=1.5$  时, 实现光开关必须把参数限制在如下范围:  $\alpha < 0.44$ , 处于“开”状态时  $P$  小于  $P_c$ 。因此, 能用作连续光开关的参数范围随着增益系数的增加而减小(在图 2 中,  $\alpha < 0.44$ )。另外, 还存在一条临界线  $B$ , 在此临界线上存在三种状态: 低输入功率时近周期输出、高输入功率下的阻尼振荡及自振荡输出。从图 1 和图 2 发现, 增益与自振荡的关系更为密切。

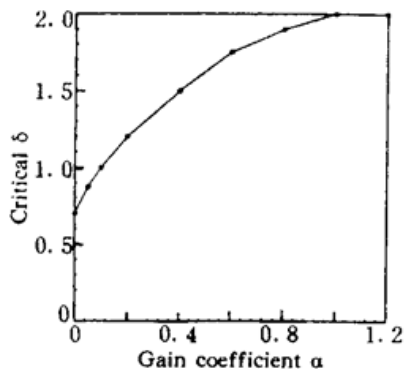


Fig. 1  $\delta_c$  vs  $\alpha$ . The dots indicate the numerical calculations

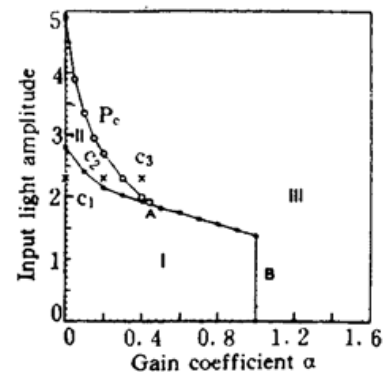


Fig. 2  $P_0^c$  and  $P_c^c$  vs  $\alpha$  under  $k=2$  and  $\delta=1.5$ . There are a critical point  $A$  and critical line  $B$ . I, II and III indicate the domains of close, steady open and self pulsing state respectively.  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  belong to I, II and III respectively

为了更直观地显示 I、II、III 三个区域中输出的特征, 图 3 给出了相应图 2 中的  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  三点处的输出, 代表了三个区域输出的典型特征。

3) 当调节参数  $P$  和  $\alpha$ , 使越过  $P_0$  或  $P_c$  曲线, 输出状态便会发生变化, 类似相变。对于  $P_0$  和  $P_c$ , 输出状态变化的过程是不同的; 越过  $P_0$ , 输出状态的变化是突变的, 类似一级相变; 越过  $P_c$ , 输出状态的变化是连续的, 从阻尼振荡连续地变化为周期自振荡, 表现为二级相变的特征。

4) 输出功率得到放大, 可以从图 3 看出, 这是很自然的。

通过数值分析发现, 形成以上结果的物理基础也是与能量密度波包的激发有关。更精确的物理图像需要解析分析, 但是即使在没有增益的情形下, 目前的文献也只能用数值分析来获得一些直观的物理图像。de Sterk 的结论同样可以用以定性解释这里的结果。图 4 给出了在

连续光入射后  $T = 30$  时的能量密度分布, 它们相应于图 2 的  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$ , 具有相同的输入功率。此时  $C_1$  和  $C_2$  都已经达到稳定输出(如图 3))。  $C_1$  对应低透过率,  $C_2$  和  $C_3$  对应高透过率,  $C_2$  是阻尼振荡输出,  $C_3$  是自振荡输出。对  $C_1$ , 没有形成一个能量密度波包。对  $C_2$ , 这个能量密度波包最终是静止的, 其峰值在光纤光栅中部。对  $C_3$ , 这个能量密度波包比  $C_2$  的空间宽度较窄而且峰值功率较高, 它是运动的。

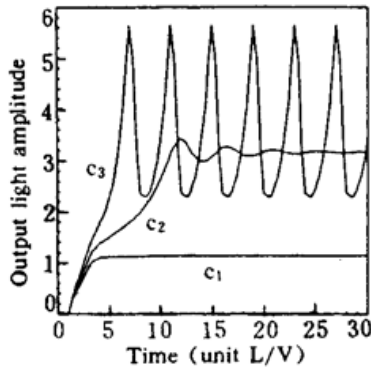


Fig. 3 The output light amplitude vs time  $T$  after cw light incidents.  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  correspond to  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  in Fig. 2 respectively

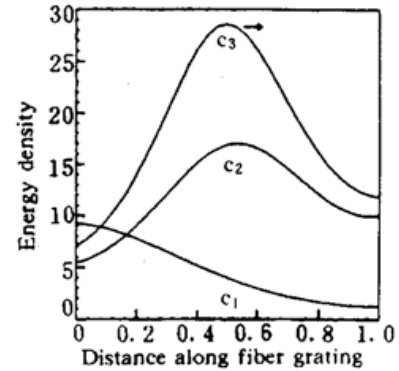


Fig. 4 The energy density ( $E_1^2 + E_2^2$ ) distribution along fiber grating at  $T = 30$ .  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  correspond to  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  in Fig. 2 respectively. The arrow indicates the movement direction

当光纤光栅无限长时, 这些能量密度波包对应于布拉格孤子<sup>[8]</sup>, 其沿光纤光栅是双曲正弦分布。布拉格孤子可以是运动的, 如果其速度为 0, 则是隙孤子<sup>[9]</sup>。布拉格孤子的运动速度与其空间宽度和峰值功率有关。对于有限长光纤光栅, 隙孤子的形状只是受到很弱的扰动<sup>[9]</sup>, 而对于运动的布拉格孤子, 由于孤子在运动过程中在光纤光栅的前后端损失能量将导致运动反向, 从而形成周期振荡。虽然在有限长光纤光栅中, 由于边界条件的影响而使布拉格孤子的形状以及运动速度、空间宽度、峰值功率三者的关系发生改变(称为准布拉格孤子), 特别是  $\alpha \neq 0$  时其形状有较大的改变(如图 4 的  $C_2$ ), 但是仍然可以用这种有限长光纤光栅中准布拉格孤子的激发、运动来定性地解释这里的结果。布拉格孤子的激发需要一定的临界功率, 当有布拉格孤子激发时则产生高透过率, 反之则产生低透过率。这样, 在图中越过  $P_0$  时输出状态的改变是突变的, 在一定的增益系数下, 入射功率大于某一临界值时, 输出会从低透过率跃变为高透过率。一旦准布拉格孤子被激发, 随着输入功率或增益系数的增加, 其空间宽度以连续变化的方向越来越窄而且峰值功率越来越大, 从而使其更易于运动, 导致阻尼振荡输出的弛豫时间越来越长, 到达某一临界值时, 趋于无穷大即自振荡。这就导致在图 2 中越过  $P_0$  时输出状态的变化是连续的。

**结 论** 本文提出并研究了掺铒光纤光栅在连续光下的开关特性, 发现掺铒光纤光栅作为连续光开关器件是不合适的。换言之, 对于长脉冲光, 虽然可以得到放大输出, 但由于易于产生自振荡, 破坏了其作为开关的性能。但从脉冲串产生的角度来看, 高增益掺铒光纤光栅是很有价值的。单纯从其开关动力学特征来看, 本文发现在输入功率-增益系数相空间 ( $P, \alpha$ ) 上, 存在三个具有不同输出特征的区域, 它们构成一个非常类似于相变过程的相图。

虽然作为连续光开关, 掺铒光纤光栅是不合适的, 但在短脉冲情形下, 它却极大地改进了开关特性, 这将在另文讨论。

## 参 考 文 献

- [1] H. G. Winful, J. H. Marburger, E. Garmire, Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structure. *Appl. Phys. Lett.*, 19979, **35**(5) : 379~381
- [2] C. M. de Sterke, J. E. Sipe, Switching dynamics of finite periodic nonlinear media: A numerical study. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **42**(5) : 2858~2869
- [3] P. St. J. Russell, J-L. Archambault, L. Reekie, Fiber gratings. *Physics World*, 1993, **10**(10) : 41~46
- [4] N. D. Sankey, D. F. Prelewitz, T. G. Brown, All-optical switching in a nonlinear periodic-waveguide structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(12) : 1427~1429
- [5] A. Mecozzi, J. D. Moores, H. A. Haus *et al.*, Soliton transmission control. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(23) : 1842~1843
- [6] H. G. Winful, Pulse compression in optical fiber filter. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(6) : 527~529
- [7] C. M. de Sterke, K. R. Jackson, B. D. Robert, Nonlinear coupled-mode equation on a finite interval; a numerical procedure. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(2) : 403~412
- [8] D. N. Christodoulides, R. I. Joseph, Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structure. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(15) : 1746~1749
- [9] W. Chen, D. L. Mills, Gap solitons and the nonlinear response of superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(2) : 160~163

## Switching Dynamics in Erbium-Doped Nonlinear Fiber Grating

Liu Junmin\*      Xu Wencheng      Liao Changjun      Liu Songhao

(*Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631*)

(Received 7 January 1995; revised 12 June 1995)

**Abstract** A new kind of fiber grating —— active fiber gratings is proposed to avoid the energy loss in optical pulse switching process of nonlinear fiber gratings. This paper studies the characteristics of switching dynamics in erbium-doped nonlinear fiber gratings under cw light. The results show that under cw light, the switching of the proposed fiber grating is a phase-transition-like process. As a cw light switching device, the active fiber grating is not as good as expected, but it is advantageous as a pulses generator.

**Key words** erbium-doped nonlinear fiber grating, switching dynamics.