

# 室温下 ZnS 干涉滤光片的快速开关

杨向明 杨 森 李淳飞

(哈尔滨工业大学物理系, 150006)

**摘要:** 本文中以连续  $\text{Ar}^+$  激光作为维持光, 以脉冲 Nd:YAG 倍频激光作为触发光, 用 CW + P 的方法在室温下实现了 ZnS 干涉滤光片的快速开关。开启时间为 300 ns。在理论上分析了实现快速开关的条件。

**关键词:** 光学双稳, 光开关, 瞬态行为

## Fast switching of ZnS interference filters at room temperature

*Yang Xiangming, Yang Miao, Li Chunfei*

(Physics Department Harbin Institute of Technology, Harbin)

**Abstract:** Fast switching in the ZnS interference filter at room temperature with the method of CW + P are reported. The samples were excited with a CW  $\text{Ar}^+$  laser as the holding light and a pulsed Nd:YAG frequency-doubled laser beam as the exciting light. The switching time is 300 ns and the conditions for realizing fast switching are analysed theoretically.

**Key words:** optical bistability, optical switching, transient behaviour

### 一、引言

自从 1977 年苏联的 Karpushko 等人发现了 ZnS 干涉滤光片的非线性特性<sup>[1]</sup>, 特别是 1982 年 Weinberger 和 Gibbs 等人实现了其光学双稳性<sup>[2]</sup>之后, 干涉滤光片作为一种非线性光学器件受到重视。经过努力, 人们已将干涉滤光片实现双稳态的阈值功率下降到 mW 数量级, 功率密度可小至  $260 \text{ mW/cm}^2$ 。研究发现, 干涉滤光片具有阈值功率低、易于探测、室温下运转、可同时并行处理多路信号等优点, 是光计算回路逻辑功能预言性研究的理想器件。

不过, 由于其双稳态机制是热机制, 而在热效应占主导地位的过程中, 开关时间与器件的热弛豫时间有关, 热弛豫时间为  $\mu\text{s}$  量级, 从而大大影响了干涉滤光片的开关速度。

提高干涉滤光片的开关速度, 可用连续光维持加上脉冲光触发的方法来实现<sup>[3,4]</sup>。本文报道了用此方法在中心波长为 530 nm 的 ZnS 干涉滤光片上获得的 300 ns 的快速开关, 并在理论上加以分析。

## 二、理 论

一个给定器件的开关时间与器件的响应时间  $\tau_d$ 、介质的弛豫时间  $\tau_r$  和脉冲宽度  $\tau_p$  有关<sup>[5]</sup>。在脉冲光作用下,要实现双稳态,必须满足条件  $\tau_p \gg \tau_r, \tau_d$ 。在连续光加脉冲光作用下情形有所不同,开关的发生与脉冲光斑的面积有关。如果光能的维持点不是很接近双稳态临界上的跳点,并且满足条件  $\tau_d \gg \tau_r$ ,那么开启器件所需要的脉冲最小宽度应满足条件  $\tau_p I_p^{\max} = O^{+e}$ ,其中  $I_p^{\max}$  是脉冲光振幅,  $O^{+e}$  为一常数<sup>[6]</sup>。

干涉滤光片是由交替蒸镀的低折射率材料和高折射率材料组成,这种结构具有 FP 腔的特点,两边的两组反射膜相当于 FP 腔的两个反射镜。FP 型器件具有与温度有关的非线性折射率和弱的非线性吸收。在连续光加脉冲光作用下,假定两束光入射到介质的同一点上,在该点温度的传播可以忽略,那么干涉滤光片的温度  $T$  的瞬态值可用热扩散方程来描述:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

式中  $\rho$  是介质密度,  $C$  是介质比热,此处的  $\lambda$  是非线性介质的热导率,  $Q$  是两束光带入介质的能量。

$Q$  可表述为

$$Q = Q_1 + Q_2 = [\alpha_{1(T)} P_1^{(t)} + \alpha_{2(T)} P_2^{(t)}] / d \pi^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别是介质在连续光  $\lambda_1$  波长和脉冲光  $\lambda_2$  波长时的吸收系数,  $P_1^{(t)}$  和  $P_2^{(t)}$  分别是连续光和脉冲光的功率,  $d$  是光斑直径。

假设脉冲形状为高斯型,可表示为

$$\begin{aligned} P_2^{(t)}(t) &= P_m \cdot \exp\{-[(t-t_0)/\Delta t]^2\} & t \in [t_0-3\Delta t, t_0+3\Delta t] \\ P_2^{(t)}(t) &= 0 & t \notin [t_0-3\Delta t, t_0+3\Delta t] \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $P_m$  为最大振幅,  $\Delta t$  为脉冲宽度。

若开始时不考虑脉冲光的贡献,通过解 Maxwell-Bloch 方程可以得出,当输入功率在双稳态下跳阈值  $P_{1e}^{(t)}$  和上跳阈值  $P_{1e}^{(t)}$  之间时,有三个解存在,其中两个解是稳态的。系统在初始时处在两个稳态解中的一个,如果此时附加一个小的扰动,则系统最终将返回平衡点。

假设干涉滤光片初始时稳定在双稳低态即低温度态,对应稳态工作点  $M_1(P_{1e}^{(t)}, T_{e1})$ ,  $T_{e1}(M_1)$ 、 $T_{e2}(M_2)$  和  $T_{e3}(M_3)$  是输入光为  $P_{1e}^{(t)}$  时的三个解,满足  $T_{e1} < T_{e2} < T_{e3}$ ,其中  $T_{e1}$  和  $T_{e3}$  是稳态的。由于附加的高斯型脉冲光引起器件温度升高,用预测-校正方法解方程(1)和(2),

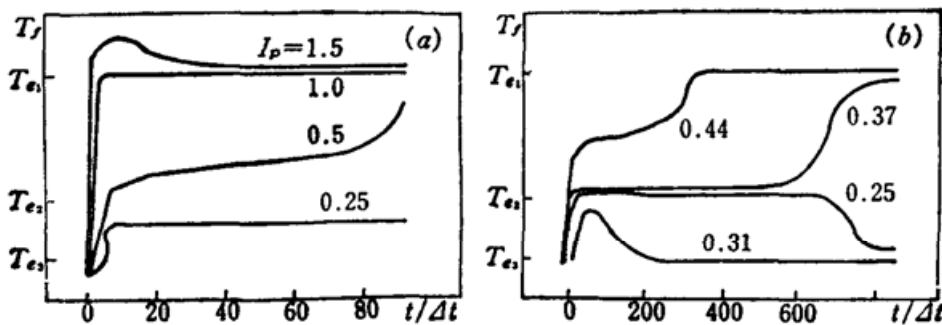


Fig. 1 Temporal variation of temperature for different pulse energies

可以得出温度的增加量。当脉冲的总强度不同时，器件在脉冲作用结束后可以达到的温度不同，见图 1。 $T_f$  是器件在脉冲结束时所达到的温度， $I_P$  用  $T_f = T_{e_0}$  时的值进行归一。

若触发脉冲作用后器件达到的温度  $T_f > T_{e_0}$ ，由脉冲光带入器件的能量过多，多余的能量必须耗散掉直至器件达到平衡。当温度升到  $T_{e_0}$  时，干涉滤光片的透射峰由  $\lambda_1$  移到  $\lambda_2$ ，对应连续光的透射光强增加。由于多余能量导致的过热，使干涉滤光片透射峰发生过多移动，连续光透射光强下降。在能量耗散过程中，干涉滤光片透射峰回到  $\lambda_2$ ，达到稳定。此过程相当于缓慢增加透射光强，向平衡态弛豫的时间比脉冲宽度大许多，故开启时间较长。见图 1(a) 中  $I_P = 1.5$  曲线。

当脉冲带入器件的能量正好使  $T_f = T_{e_0}$  时，脉冲光提供了系统到达高温态即双稳上态所需的能量，系统在脉冲结束时已达到平衡。此时系统由连续光维持在高温态，不再发生变化。在这种情况下，介质中能量传播是最优化的，器件可以达到快速开启，开启时间约为脉冲宽度的数量级。见图 1(a) 中  $I_P = 1$  曲线。

当  $T_{e_1} < T_f < T_{e_0}$  时，由于系统不能稳定在不稳定点  $M_2(T_{e_0})$ ，同时也排斥点  $M_1(T_f < T_{e_0})$  和点  $M_3(T_f > T_{e_0})$  的吸引，故器件达到平衡所需的时间很长，此过程对应于临界慢变，见图 1(b)。

由以上分析可知，尽管热双稳器件的热弛豫时间较长(与  $\rho C \Delta S / \lambda$  成正比)，但我们采用连续光维持加脉冲光激励的方法可以使器件快速上跳至高态，从而使开启时间大大缩短。值得注意的是在此过程中必须正确选择脉冲宽度和脉冲能量。

### 三、实验装置及结果

实验所用的装置如图 2 所示。其中  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  是对于波长  $0.53 \mu\text{m}$  的全反镜， $A_1$ 、 $A_2$  是可调衰减片， $PD_1$  和  $PD_2$  是快速光电二极管， $L_1$  和  $L_2$  是透镜， $HR$  是对  $0.53 \mu\text{m}$  的光透过而对  $1.06 \mu\text{m}$  的光全反射的介质膜滤光镜， $IF$  是 Zn S 干涉滤光片，其中心波长在  $530 \text{ nm}$ ，半宽度为  $6.8 \text{ nm}$ ，峰值透过率为  $50\%$ 。波长  $514.5 \text{ nm}$  的氩离子激光用作干涉滤光片的维持光，脉冲 Nd:YAG 经倍频后的  $0.53 \mu\text{m}$  激光用作触发光，其脉冲宽度为  $25 \text{ ns}$ ，原来的基频  $1.06 \mu\text{m}$  激光用作示波器的外触发源。

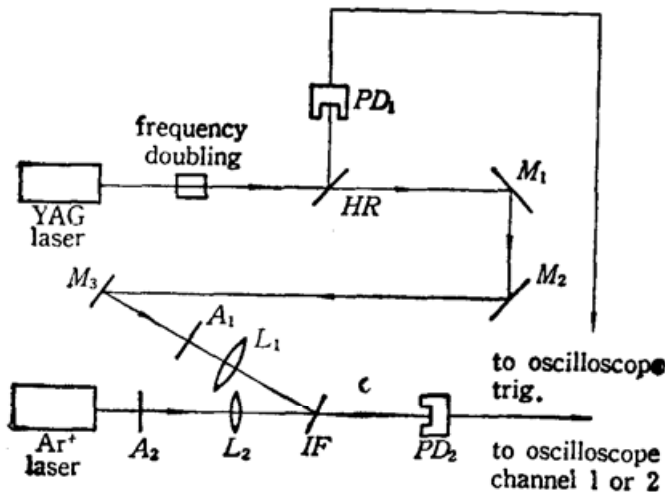


Fig. 2 Experimental set-up

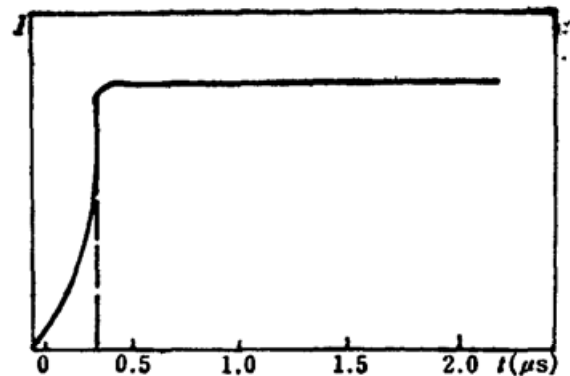


Fig. 3 Fast switching obtained with CW + P method

实验时首先用  $\text{Ar}^+$  激光调节干涉滤光片的预偏置。连续的  $\text{Ar}^+$  激光经调制盘变成三角波, 倾斜入射到 Zn S 干涉滤光片上, 用示波器的  $x-y$  模式可观察到双稳回线。实验中实现双稳的光功率阈值约 100 nW, 双稳开启时间 20 ms。调节衰减片改变入射光强, 使干涉滤光片的入射能量维持在接近双稳上跳阈值的大小。然后用  $0.53 \mu\text{m}$  脉冲激光入射到样品的同一点上, 适当调节脉冲激光的能量即可将样品由低态激发到高态, 开启时间为 300 ns, 实验结果见图 3。实验中实现触发开关的脉冲能量为 3mJ。逐渐减小脉冲光的能量到一定值时就会发现干涉滤光片的双稳态不能开启, 不过用观察屏还可以观察到干涉环向外扩张。若再继续减小脉冲光的能量, 则用肉眼就观察不到影响了。这与理论分析中得出的器件开关同脉冲能量有关的结论相符。

### 参 考 文 献

- 1 F. V. Karpushko, G. V. Sinityn *et al.*, *Spektlos*, **29**, 820(1978)
- 2 P. A. Weinberger, H. M. Gibbs, *J. O. S. A.*, **72**, 1769(1982)
- 3 J. Y. Bigot, *Appl. Phys. Lett.*, **49**(4), 844(1986)
- 4 A. Daunois, *Opt. Commun.*, **62**(5), 360(1988)
- 5 T. Bischofberger, Y. R. Shen, *Phys. Rev. A*, **19**(3), 1169(1979)
- 6 F. A. Hopf, P. L. Meystre, *Opt. Commun.*, **29**, 235(1979)