

窄带半导体光学双稳性的稳态特性

刘玉东 王其明 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 150006)

提要: 本文提出了一个窄带半导体双光子光学双稳性的稳态理论模型。分析了 InSb、HgCdTe 的光学双稳性的稳态特性, 并从实验上获得了理想的脉冲整形效应。

关键词: 光学双稳态, 窄带半导体, 脉冲整形

Steady state property of dynamic optical bistability in narrow-gap semiconductors

Liu Yudong, Wang Qiming, Li Chunfei

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin)

Abstract: The steady state model of two-photon optical bistability in narrow-gap semiconductors are presented. The steady property of dynamic optical bistability in InSb and HgCdTe are analyzed and the ideal pulse shaping effect is obtained experimentally.

Key words: optical bistability, narrow-gap semiconductor, pulse shaping

一、前言

由于光学逻辑和光信息处理的需要, 窄带半导体的室温光学双稳态受到了人们的很大重视, 实现了 InSb^[1]和 HgCdTe^[2]的室温动态双稳性。文献中采用的是 30 ns 脉宽的脉冲光。我们曾用 100 ns 脉宽的脉冲光实现了 HgCdTe^[3]和 InSb^[4]的室温光学双稳性。在以往的研究中, 人们较多注意的是光学双稳性的动态特性, 比如其响应时间、开关速度等等^[1~4], 而未涉及到动态双稳性中的稳态特性及其应用。当采用 100 ns 脉宽的脉冲时, 这一特性已表现得非常明显。在我们的实验中, 这一特点表现为对入射脉冲中的子脉冲振荡有整形作用, 即当入射脉冲不是规整的波形, 而是有许多高频的尖峰时, 透过样品的脉冲不是随入射波形的尖峰而变, 而是将尖峰滤掉形成一个接近标准脉冲的形状。此实验结果, 已不能用动态模型来解释^[3~4]。为此, 我们根据窄带半导体的非线性机制, 采取了一个简化的稳态解析模型, 这一模型是采用 100 ns 脉冲的一个特例。但该模型适用于实验研究与解释, 同时也适用于当入射脉冲宽度大于 100 ns 的情况和连续光工作的情况。利用该模型的分析表明, 动态光学双稳性具有稳态特性, 可用以整形, 实验中已成功地观察到整形的效果。并可应用于一般多模激光器的脉冲波形整形, 以及

作为在光计算中的前级门以保证入射脉冲波形的稳定。

二、理论模型

HgCdTe 和 InSb 的非线性机制都可以归结为自由载流子等离子体非线性和带充满非线性 (band filling)^[5], 它们的载流子复合机制相同, 在室温双光子激发下均为 Auger 复合为主导。根据 [3, 4] 可采用统一的非线性 F-P 理论来分析这两种半导体材料:

$$I_t/I_i = A/(1 + F \sin^2 \delta) \quad (1)$$

$$dN_e/dt = \beta I_c^2/2\hbar\omega - N_e/\tau_A \quad (2)$$

$$I_c = I_t/O_T \quad (3)$$

此处,

$$A = e^{-\alpha L}(1 - R)^2/(1 - Re^{-\alpha L})^2 \quad (4)$$

$$F = 4Re^{-\alpha L}/(1 - Re^{-\alpha L})^2 \quad (5)$$

$$O_T = [\alpha Le^{-\alpha L}(1 - R)]/[(1 - e^{-\alpha L})(1 + Re^{-\alpha L})] \quad (6)$$

$$\frac{1}{\tau_A} = \left(1 + \frac{N_e}{N_i}\right)\left(2 + \frac{N_e}{N_i}\right)/2\tau_i \quad (7)$$

$$\delta = \delta_0 + (2\pi/\lambda)L\sigma N_e \quad (8)$$

这里, I_i 和 I_t 分别为 F-P 标准具的入射和透射光强; N_e 和 N_i 分别为自由载流子浓度和本征载流子浓度; τ_A 和 τ_i 分别为 Auger 复合时间和本征复合时间; α 和 β 分别为单光子和双光子吸收系数; I_c 为 F-P 标准具内部光强; L 为 F-P 的厚度; R 为 F-P 两面的反射系数; λ 和 $\hbar\omega$ 分别为入射激光波长和光子能量; δ_0 为位相初始失谐量; σ 为非线性折射率截面。

在较低激发下, 在 HgCdTe 和 InSb 中载流子复合时间都较长, 分别为 90 ns^[2] 和 47 ns^[1]。而在较高的激发下, 载流子浓度增加, 由 (7) 式可以看出, 这会使 Auger 复合时间减小。在我们的实验中, 当脉冲峰值功率较高时, HgCdTe 的 Auger 复合时间可小到 10 ns, 而 InSb 的 Auger 复合时间可小到几个 ns。此时的复合时间与脉冲宽度 100 ns (HMF_{FW}) 比起来可以认为是很小的。因而, 在较高光强下, 可对方程 (2) 作准稳态近似。由前面方程 (1) ~ (7) 可得到解析方程:

$$I_t = aI_i + bI_i \sin^2\{\delta_0 + f[(2 + gI_i^2)^{1/3} - 1]\} \quad (9)$$

$$a = (e^{\alpha L} - R)/(1 - R)^2 \quad (10)$$

$$b = 4R/(1 - R)^2 \quad (11)$$

$$f = (2\pi/\lambda)L\sigma N_i \quad (12)$$

$$g = \beta\tau_i/\hbar\omega O_T^2 N_i \quad (13)$$

方程 (9) 表示非线性 F-P 的入射光与透射光之间的关系, 是一个双稳态方程。其中包含线性项和非线性项。在非线性项中可看出, 相位 δ 与 $I^{2/3}$ 成正比, 反映了 Auger 复合与双光子吸收的特点。该表示式形式简单, 物理意义明确, 宜于估算双稳态位相失谐量大小, 双稳态阈值及器件最佳化。式中 a 表示双稳回线的斜率, b 为空腔 F-P 标准具的精细度, f 为本征载流子浓度对相位的影响, 而 g 为双光子吸收和复合对相位的影响。分析 (9) 式, 求出器件最佳化

时 a, b, f, g 的值, 便可预言出较好的双稳态开关半导体器件。

求解方程(9), 所得结果示于图 1。图 1(a) 为 $\delta_0 = -0.5\pi$, 此时得到了较低阈值的光学双稳态。这一点正是以往的实验工作者所追求的低光强下的双稳态, 但其双稳回线的区域较窄, 即其动态特性较强; 而在图 1(b) 中, 当 $\delta_0 = 0$ 时, 双稳态的开启阈值功率已经增加到了图 1(a) 中的三倍左右, 这对于只追求双稳态的阈值来说, 不是好结果。而此时的稳态范围较宽, 其上跳和下跳的阈值差别较大, 关闭的阈值比开启的阈值小得多。本文正是利用这一特点进行整形的研究。

当入射脉冲波形不规则时, 可出现许多尖峰, 每个尖峰对样品来说又相当于单个脉冲, 但由于它们间隔较小, 相当于连续的脉冲串。只要其连接间隔小于器件的响应时间, 并且尖峰的底部高于 I_{off} 的值, 则脉冲串就会被整形为一个脉冲。因为样品的稳态特性保证了, 当第一个尖峰下沿还未使样品的双稳态下跳时, 另一个尖峰的前沿已经达到。

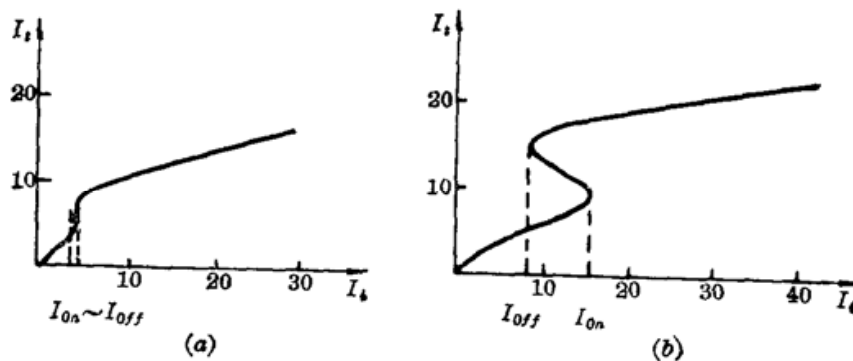


图 1 双稳态的解析解(9)式的计算结果。(a) $\delta_0 = -0.5\pi$; (b) $\delta_0 = 0$

三、稳态特性的实验结果

实验采用 $200 \mu\text{m}$ 厚的两面抛光的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ F-P 标准具, $x = 0.223^{[3]}$ 。采用与文献[4]中类似的实验装置。在脉冲探测上采取了双脉冲单次同路记录的方法, 即将入射脉冲延迟后与出射脉冲接入同一路扫描, 用此法可解决单脉冲记录的问题, 并能克服快脉冲的双路扫描的困难。将出射脉冲放在入射脉冲前面记录(参看图 2)是确保出射信号的信息比入射信号更丰富, 以确定整形的效果。

由前面的分析知, 为了获得较好的稳态特性, 须调解初位相失谐量。在实验中调解入射光与样品角度, 结果如图 2 所示。入射脉冲中的尖峰在通过样品后被平滑掉。在图 2(a) 中, 入射脉冲中前两个尖峰间隔小于 40 ns , 被合并为一个, 而后面尖峰处于脉冲尾部被样品压低。这样, 得到的透射脉冲宽度远小于入射脉冲宽度, 而接近规则脉冲输出时的宽度 100 ns 。图 2(b) 中的情形与图 2(a) 中类似, 尾部被压低。但图 2(b) 中的第三个峰在透射脉冲上稍有反映, 这是由于图 2(b) 中的入射脉冲峰值功率 I_p 较大的缘故。当峰值功率大时, 样品的响应速度变快, 这是由 Auger 复合的特点决定的。

实验结果表明, 理论模型与实验结果一致, 达到了预期的整形效果。实验中发现只要入射

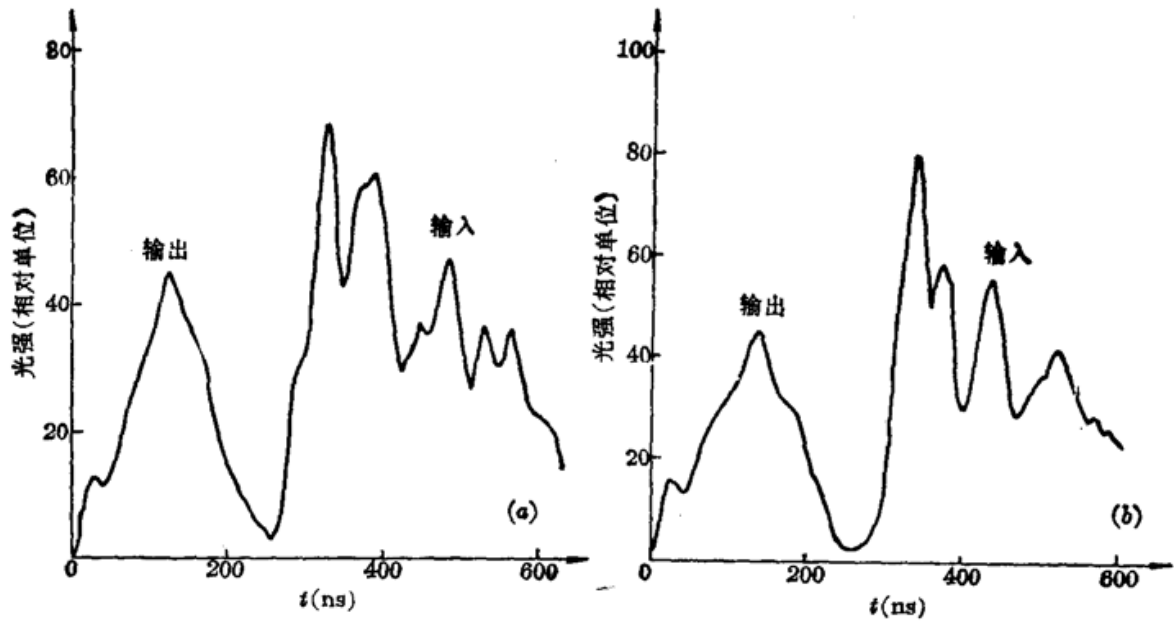


图2 利用稳态特性得到的脉冲整形的实验曲线。(a) $I_p = 688 \text{ kW/cm}^2$; (b) $I_p = 894 \text{ kW/cm}^2$

脉冲中的子脉冲尖峰频率大于 30 MHz ，尖峰都将被平滑。当入射脉冲峰值功率大于 1 MW/cm^2 时，由于此时器件的响应速度提高，已不具有整形效果，且由于自散焦的原因，还会出现 F-P 本身的不稳定性。

四、讨 论

文献[3]表明，当入射脉冲峰值功率 I_p 达到 540 kW/cm^2 时，即可出现不稳定性。而本文实验中， I_p 可高至 987 kW/cm^2 甚至 1 MW/cm^2 仍可有整形作用。这是由于入射脉冲是振荡的，其光强不是持续增加，从而减少了载流子浓度的积累。同时，HgCdTe 的响应较慢，总的效应相当于积分效应，即入射振荡脉冲相当于一个峰值较低的方波脉冲入射，其平均峰值功率并不很高。

利用 InSb 材料，在室温下也可作整形实验研究，只是 InSb 响应较 HgCdTe 快，所适用的入射脉冲中的振荡频率要更高些。另外，InSb 对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的透过率较 HgCdTe 低，应用价值较小。

参 考 文 献

- 1 D. Graig *et al.*, *Infrared Phys.*, **25**, 289(1985)
- 2 A. K. Kar *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **42**(4), 334(1983)
- 3 刘玉东 *et al.*, 中国激光, **15**(4), 253(1988)
- 4 王其明 *et al.*, 哈尔滨工业大学学报, **5**, 1(1988)
- 5 A. Miller *et al.*, *Adv. Phys.*, **30**, 697(1981)