

# 非线性光导开关输出脉冲延迟时间的研究

石顺祥 万贤军

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

**摘 要** 利用非线性光导开关的雪崩注入模型, 讨论了光导开关工作偏压、光导开关材料的深能级杂质浓度、光脉冲能量等参量对非线性光导开关输出脉冲延迟时间的影响, 给出了一些有意义的结论。

**关键词** 非线性光导开关, 延迟时间, 雪崩注入模型。

## 1 引 言

自从 1975 年光导开关技术由 Auston 提出以来, 一直受到人们的重视。在八十年代后期<sup>[1]</sup>, 人们又提出了非线性光导开关的概念。相对于光导开关的导通完全取决于光生载流子浓度的线性工作模式来说, 非线性光导开关的导通主要是依赖于光生载流子的雪崩增长过程, 光脉冲仅起了触发和产生载流子种子源的作用。一旦光导开关因载流子浓度的雪崩增长导通, 即使光脉冲熄灭, 只要外电路能提供足够的功率, 开关也会一直维持导通状态, 同时两端电压将锁定在一个固定值  $E_l$  上。实验指出, 对 GaAs · EL2 光导开关而言, 其锁定电场  $E_l \approx 4 \text{ kV/cm}$ <sup>[2]</sup>。非线性光导开关工作的特点是在高偏置电压下, 即使光脉冲能量比线性光导开关要求的能量低 3~5 个数量级<sup>[3]</sup>, 也能使开关导通。因此, 可以利用激光二极管来激励光导开关, 产生高压、高功率电脉冲, 并可望制成一种小型的、高重复率、高功率超短电脉冲信号产生器件。

对非线性光导开关已进行了许多理论和实验研究, 但至今对其物理机制仍不很清楚。尽管非线性光导开关有许多独特的优点, 并可望制成新型器件, 但相对线性光导开关的工作来说, 由于输出电脉冲相对光脉冲激励时刻有一个延迟, 导致了输出电脉冲的时间抖动。因此, 研究非线性光导开关工作的物理过程, 研究非线性光导开关输出电脉冲延迟特性, 是非线性光导开关器件研究中的重要课题。本文拟利用雪崩注入模型, 讨论非线性光导开关的工作, 并从理论上计算非线性光导开关输出电脉冲的延迟时间及其影响因素, 为非线性光导开关器件的研究和应用提供理论依据。

## 2 理论分析

### 2.1 非线性光导开关的雪崩注入模型

如图 1(a) 所示, 电极与光导材料欧姆接触的光导开关可以看作是  $n^+ - i - n^+$  结构, 其阳极可

认为是一个反偏结, 阴极是一个正偏结。它与传统的半导体  $n^+ - i - n^+$  器件相比, 只是中间的本征层更长些, 具有更高的阻断电压, 更适合于作高压、大功率器件。

处于高偏压状态下的光导开关, 在没有光脉冲激励时, 可以认为电场为均匀分布,  $E_0 = V_0/L$ , 如图 1(b) 所示。当有光脉冲照射时, 将在光导开关内产生光生载流子, 它们在高电场的作用下, 要向电极方向移动, 导致靠近阳极区域电子浓度增多, 空间电荷也增多, 逐渐形成一个高场区。对于象 GaAs、InP 这样的具有电子转移效应和耿氏效应的半导体材料, 当偏置电场  $E_0$  接近其耿氏阈值场  $E_t$  时, 其场分布将如图 1(c) 所示, 在阳极区形成一个很高的高场畴, 其峰值电场  $E_m(t)$  满足下面的关系<sup>[2]</sup>

$$E_m(t) = \left[ \frac{2qN_T(x,t)[V(t) - E_t L]}{\epsilon} \right]^{1/2} \tag{1}$$

式中,  $N_T(x,t)$  为电子陷阱密度,  $V(t)$  为光导开关两端电压, 且

$$V(t) = V_0 - \frac{V_0 R_L}{R_L + [1/G(t)]} \tag{2}$$

式中,  $R_L$  为负载电阻,  $G(t)$  为光导开关的电导值。当这个高场畴的峰值电场  $E_m$  大于材料的本征击穿电压  $E_b$  时, 阳极区发生雪崩电离, 产生大量的电子、空穴对, 空穴在电场的作用下, 注入到本征区, 此即雪崩注入。于是, 光导开关由单载流子(电子)导电状态, 转为双载流子导电状态, 电流迅速增大, 这就是光导开关的导电过程。由于外电路电阻的限流作用, 电流并非无限增大, 而是趋于由材料特性决定的一个稳定值, 相应光导开关处于锁定状态, 光导开关的场分布为图 1(d) 所示的静态高场畴分布。

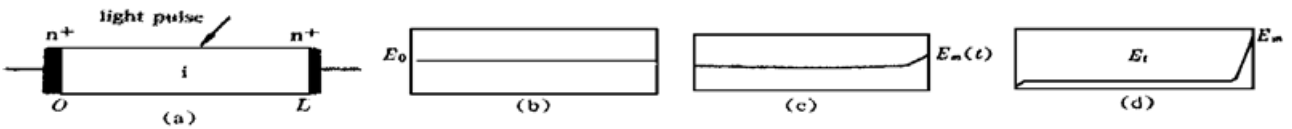


Fig. 1 The nonlinear photoconductive semiconductor switch (PCSS) and its field profiles

### 2.2 非线性光导开关输出电脉冲延迟时间的计算

假设光脉冲开始照射光导开关的时刻为  $t = t_1$ , 对应光导开关高场畴峰值电场  $E_m(t_1) = E_0$ , 开始产生雪崩注入的时刻为  $t = t_2$ , 对应光导开关高场畴峰值电场  $E_m(t_2) = E_b$ , 则输出电脉冲的延迟时间  $t_{delay} = t_2 - t_1$ 。为了确定这个延迟时间, 必须要确定相应  $t_2$  时刻的  $N_T(t_2)$  和

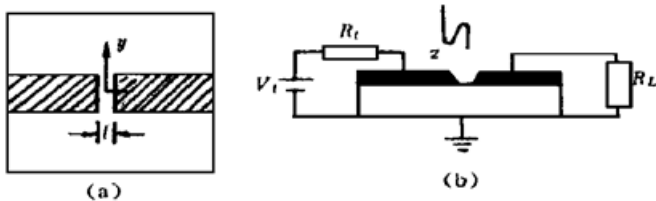


Fig. 2 Scheme of photoconductive semiconductor switch (PCSS)

$V(t_2)$ 。根据半导体光电子学理论, 对于图 2 所示的光导开关, 在  $t_1 \sim t_2$  时间间隔内的载流子浓度速率方程为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{opt} - \nabla \cdot s_n - \frac{n}{\tau} + \frac{\partial N_T}{\partial t} \tag{3}$$

式中, 等式右边第一项为光生载流子产生率, 对于入射激光脉冲光强为  $I_0(x,t)$  时,

$$G_{opt}(x,t) = \frac{\alpha I_0(x,t)}{h\nu} (1 - R) \exp(\alpha z) \tag{4}$$

式中,  $\alpha$  为光吸收系数,  $R$  为光导开关表面反射率; 等式右边第二项为流进单位体积的载流子速率, 且有

$$s_n = - \mu_n n E - D_n \nabla n \tag{5}$$

它反映了载流子的漂移和扩散效应; 第三项为载流子的复合衰减,  $\tau$  为载流子的复合寿命; 第四项表示了深能级杂质的复合作用, 对于单能级电子陷阱的俘获,

$$\frac{\partial N_T(x, t)}{\partial t} = - N_T(x, t) n(x, t) v_n \sigma_n \quad (6)$$

式中,  $v_n$  为电子速度,  $\sigma_n$  为俘获截面。

如果知道了光导开关中载流子浓度的变化规律, 即可根据下式求出光导开关的光电导

$$G(t) = \iint dy dz \left[ \int_{-l/2}^{l/2} dx \frac{1}{\mu_n e n} \right]^{-1} \quad (7)$$

利用时域差分法, 对上面的方程组求解, 其初始条件和边界条件为:

$$n(x, 0) = 0, \quad n(0, t) = 0, \quad n(L, t) = 0$$

若给定光脉冲入射时刻为  $t_1$ , 通过计算机求解, 求出阴极高场畴峰值场  $E_m(t)$  等于雪崩阈值场  $E_b$  的时刻为  $t_2$ , 则可求出  $t_{\text{delay}}$ 。由上面的方程组明显可见,  $t_{\text{delay}}$  与工作偏压、光导材料的陷阱浓度及光脉冲能量有关。因此, 对不同的工作偏压、陷阱浓度、光产生率分别进行了计算, 计算的结果由下面的曲线给出。计算过程中采用主要参数为: 光生载流子产生率  $G_{\text{opt}} = 10^{11}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ , 它较之通常的线性工作情况低 3 个数量级,  $\mu_n = 8000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,  $\tau = 1 \text{ ns}$ ,  $\sigma_n = 10^{-13} \text{ cm}^2$ ,  $L = 0.1 \text{ cm}$ 。

图 3 描述了光导开关的工作偏压对输出电脉冲延迟时间的影响。由图可见, 随着工作偏压的增大, 延迟时间逐渐减少, 当光导开关的工作偏压低于阈值电压 ( $V_t = E_b L$ ) 时, 延迟时间趋于无限大, 这就是说雪崩注入不可能发生, 这种情况对应于线性光导开关的工作情况, 因为光脉冲能量太小, 开关不可能导通。同时, 在该图上还给出了不同陷阱浓度的影响。对于给定的偏压值, 陷阱浓度较大[曲线(a)]时的延迟时间, 比陷阱浓度较小[曲线(b)]时的延迟时间小。为了更明显地说明陷阱浓度的影响, 给出了如图 4 所示的光导开关中陷阱浓度对输出延迟影响的计算曲线。由图可见, 增大陷阱浓度, 可以减少输出电脉冲的延迟时间。这是因为陷阱浓度的增大, 会导致整个光导开关器件中陷阱效应的增强, 必然引起空间电荷的增多, 使得延迟时间变短。

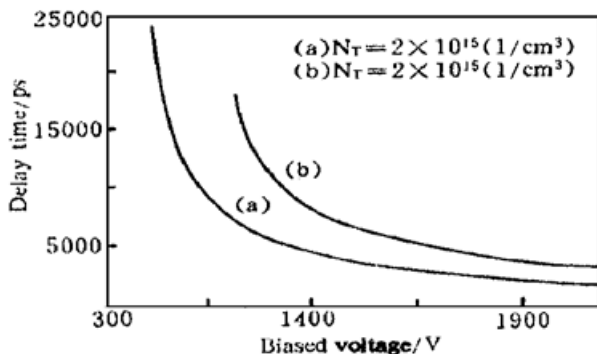


Fig. 3 The effect of the biased voltage of nonlinear PCSS on the delay time of the output

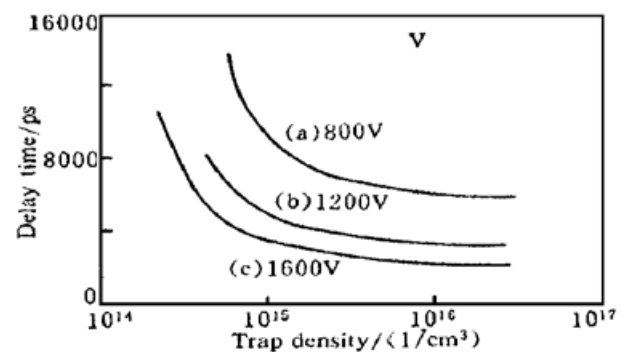


Fig. 4 The effect of the trap density in the nonlinear PCSS on the delay time of the output

图 5 为光生载流子产生率对输出电脉冲延迟时间影响的计算曲线。由图可见, 增大光生载流子产生率可以减小输出电脉冲延迟时间。当光生载流子产生率太小时, 延迟时间趋于无限大。这说明, 即使在高偏压工作时, 如果光脉冲功率太小, 开关也不会导通。图中还给出了不同偏压的影响, 显然, 工作偏压越高, 同样光生载流子产生率对应的延迟时间越小。

上面给出的理论计算曲线和结果,与国外已报道的非线性光导开关有关的实验结果相吻合。图 6 给出了 Falk 等人<sup>[4]</sup>关于延迟时间与峰值偏压关系的实验数据。可见,其变化规律与本文的计算结果一致,其延迟时间的数量级与本文的结果相同。

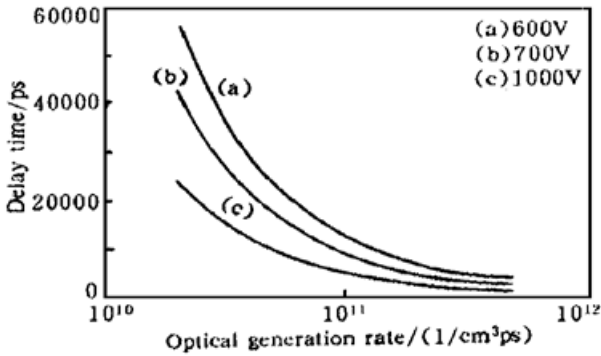


Fig. 5 The effect of the optical generation rate in the nonlinear PCSS on the delay time of the output

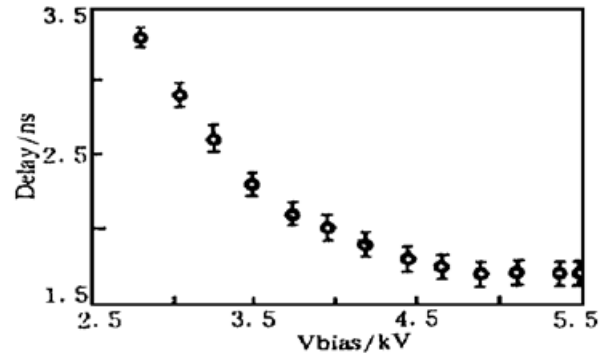


Fig. 6 The experimental data (from R. A. Falk *et al.*<sup>[4]</sup>)

**结 论** 由上面的理论分析和计算说明: 1) 为了使非线性光导开关导通,其工作偏压应大于锁定电压,例如约为  $(2 \sim 3)V_i$ ; 2) 非线性光导开关输出电脉冲延迟时间为纳秒量级; 3) 非线性光导开关导通时所需要的光脉冲能量,较之线性光导开关小 3 个数量级以上。显然,为保证非线性光导开关稳定工作,为减小非线性光导开关的时间抖动,选取适当掺杂的光导材料,提供稳定可靠的光脉冲功率和工作偏压,是极其重要的。

### 参 考 文 献

- [1] G. M. Loubriel, M. W. O'Malley, F. J. Zutavern. Toward pulsed power uses for photoconductive semiconductor switch: closing switches, *Proc. 6th IEEE pulsed power conference*. Arlington, VA, 1987, edited by P. J. Turchi and B. H. Bernstein. New York, IEEE, 1987, 145~ 148
- [2] H. Zhao, P. Hadizad, J. H. Hur *et al.*. Avalanche injection model for the look-on effect in  $\overline{=}$ power photoconductive switches. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(4) : 1807~ 1812
- [3] G. M. Loubriel, F. J. Zutavern, H. P. Hjalmarson *et al.*. Measurement of the velocity of current filaments in optically triggered, high gain GaAs switches. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(24) : 3323~ 3325
- [4] R. A. Falk, J. C. Adams. Temporal model of optically initiated GaAs avalanche switches. *Proc. SPIE*, 1990, **1378** : 70~ 81

## Delay Time of Output Pulse in Nonlinear Photoconductive Semiconductor Switches

Shi Shunxiang Wan Xianjun

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 25 February 1997; revised 15 May 1997)

**Abstract** The avalanche injection model of nonlinear photoconductive semiconductor switch is presented. The effects of the voltage across the switch, deep level impurity density and optical pulse energy on the delay time of output pulse are discussed theoretically. Some important results are obtained.

**Key words** nonlinear photoconductive semiconductor switch, delay time, avalanche injection model.