

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0327-05

非线性光导开关快速导通特性*

张同意 石顺祥 龚仁喜 孙艳玲

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要: 非线性光导半导体开关的快速导通过程总是伴有电流丝的形成, 基于电流丝形成的雪崩碰撞引起的粒子束放电机制的假定, 考虑到载流子寿命、光吸收深度、碰撞电离系数以及初始载流子浓度等因素的影响, 从理论上分析了非线性光导开关雪崩导通的物理过程和导通特性, 得到了一些与实验观测结果吻合得很好的结论, 提出了一些有利于改善和控制非线性光导开关的工作特性的可行手段。

关键词: 光控光电导半导体开关; 丝状电流; 锁定; 雪崩碰撞引起的粒子束放电; 饱和漂移速度; 导通过程
中图分类号: TN303 文献标识码: A

1 引 言

光控光电导半导体开关(PCSS)具有响应速度快、上升时间短、时间抖动低、体积小、重量轻、结构简单、易组成阵列工作等优点, 有着广泛的应用前景。

在高于一定阈值的偏置电压下, 光导开关工作于非线性模式, 表现出高增益和锁定等特性。高增益特性是指用能量很小的激光脉冲激励光导开关所产生的输出脉冲电流, 比仅由光生载流子所产生的电流大很多, 电流增益前者比后者高三到五个数量级。锁定特性是指在照明的激光脉冲熄灭后, 光导开关中仍然保持着很高的传导电流, 此时开关上的平均电场仅由开关材料决定。高增益特性使得利用激光二极管阵列激励光导开关成为可能, 从而大大提高了光导开关的应用领域。在利用 GaAs、InP、ZnSe 和金刚石等材料进行非线性光导开关工作的实验中都发现有电流脉冲的延迟^[1]和快速上升等现象。目前, 对光导开关中电流快速上升的导通过程以及锁定现象还没有逻辑一致、前后连贯的自洽理论^[2]。因为在实验上发现, 电流脉冲的快速上升过程总是与光导开关中丝状导电通道同时出现, 因此本文将基于对电流丝形成的雪崩碰撞引起的粒子束放电机制, 研究非线性光导开关的主要特性。

2 非线性光导开关中电场的分布演化和电流丝的特性

光导开关在非线形模式下工作时, 对其所发射的

红外发光进行红外成像, 可以观测到两电极间有窄的发光通道, 最亮的发光区在正电极接触处(图 1^[3])。强的发光与开关电流脉冲总是同时产生, 光脉冲宽度也与电流脉冲宽度相同, 说明开关的导通过程中形成了丝状的导电电流。电流丝发射的辐射谱线为(875 ± 10) nm, 这正对应着 GaAs 带隙的最小能量, 说明这种发光为 GaAs 的直接带隙发射^[4]。



Fig. 1 Filamentary current channel in PCSS

在对光导开关均匀照明时, 光导开关中仍然会形成不均匀的丝状电流, 但照明所需的光能较大。采用窄带和点状聚焦的照明方式, 可以大大降低触发电流丝所需的光能, 并且在阴极处照明所需的光能最小, 最易于产生电流丝。电流丝长度与外加电压无关, 但电压越高电流丝越细。电流丝直径小于 0.2 mm, 因此, 电流丝中电流密度约为 300 kA/cm² ~ 900 kA/cm²^[4,5], 载流子密度达 6 × 10¹⁸ cm⁻³^[6,7]。

实验测得电流丝在穿过开关时有一个加速过程, 其初始速度与电场无关, 而终速在电场较高时较快^[8]。由于电流丝的传播速度比载流子的饱和速度 1 × 10⁷ cm/s 快得多, 因此雪崩电流的上升时间很短, 实验值仅为几百皮秒^[6]。

电流丝的形成与光导开关内的电场分布结构密

* 国家自然科学基金(69781002)资助课题。

切相关。Schoenbach 等人^[9]发现,在低电压情况下,如果没有光照,开关中没有明显的高场区,一旦用光照明,就在阴极附近出现一个 100 μm 宽的高电场区域,在高于阈值的电压情况下,随着电压的升高在阳极区也出现类畴结构的强电场。Donaldson 和 Kingsley^[10]发现,光导开关导通过程中,开关体内有些地方电场坍塌,另外的地方电场却增强,最后演变成从低电压电极接触区向高电压电极接触区延展的低场区(高导电区),这一低场区域只占整个光激活区的 25%,也就是说形成了传导电流的电流丝。

3 非线性光导开关导通特性的理论分析

非线性光导开关的一个显著特征是其导通过程很快,电流脉冲的上升时间很短,比载流子从一个电极到另一个电极所需的转移时间短得多,电流的大小比源于两个电极的空间电荷限制电流也大得多,故而在开关电极之间一定有载流子产生。这一情形类似于气体的雪崩碰撞引起的粒子束放电击穿。雪崩碰撞引起的粒子束是一个薄而窄的高导电性等离子体电流丝,电流丝通过其头部高电场的电离而以非常高的速度增长。

Dougal 等基于雪崩碰撞引起的粒子束放电过程,对 GaAs 非线性光导开关中的导电过程进行了讨论,指出了载流子表观传播速度大于载流子饱和漂移速度的可能性^[11],并在对电流丝形状及其头部尖端半径作人为假定的情况下,给出了载流子分布的变化^[12]。本文则基于雪崩碰撞引起的粒子束放电的假定,进一步考虑了光吸收深度、碰撞电离系数、电场强度、载流子寿命、初始载流子浓度等各种因素对光导开关导通特性的影响,以及出现非线性工作的理论约束,给出了雪崩碰撞引起的粒子束头部高场电离区大小及载流子表观传播速度的估计,研究了非线性光导开关的导通特性。本文分析中,假定半导体中雪崩碰撞引起的粒子束头部存在高电场电离区,至于高电场区的起源和特性在另文中专门讨论。

假定电流丝的形成是由于其头部高电场区内发生雪崩碰撞电离所致,则在此区域内载流子应满足连

续性方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot (n\mu_n E) + D_n \nabla^2 n - U + G, \quad (1)$$

其中 n 为载流子浓度, μ_n 为迁移率, E 为电场强度, D_n 为扩散系数, U 为复合率, G 为产生率。此高电场区内的产生机制主要有两种,一种是电流丝体内载流子的直接带隙复合辐射传播到此区域后引起的光电离 G_{int} ,另一种为此高场区内载流子的碰撞电离 G_{imp} , $G_{\text{imp}} = \alpha_{\text{av}} v_n n$,其中 α_{av} 是碰撞电离系数, v_n 是载流子速度。设此区域内载流子的平均寿命为 τ_n ,则复合项可写为 $U = n/\tau_n$ 。于是(1)式可写成

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot (n\mu_n E) + D_n \nabla^2 n - \frac{n}{\tau_n} + G_{\text{int}} + \alpha_{\text{av}} v_n n. \quad (2)$$

由电流丝体内载流子的直接带隙复合辐射传播到此区域后引起的光电离 G_{int} 应为整个电流丝体内所有复合电荷所产生的辐射的总的贡献,即

$$G_{\text{int}} = \eta' \int \frac{n'}{\tau'} \exp(-\alpha_{\text{opt}} |x - x'|) dx', \quad (3)$$

式中 α_{opt} 为光吸收系数, n' 为电流丝体内的电荷密度, τ' 为电流丝体内载流子的平均寿命, η' 表示所有辐射中传播到电流丝头部高场区的部分, x 为高电场区内某点距雪崩碰撞引起的粒子束体的距离, x' 为雪崩碰撞引起的粒子束体内点的坐标,积分对整个雪崩碰撞引起的粒子束体进行。将此式积分得到

$$G_{\text{int}} = \frac{\eta n'}{\tau} \exp(-\alpha_{\text{opt}} x), \quad (4)$$

其中 η 包括了 η' 和积分的总效果。

在我们所考虑问题的极短时间和距离内,载流子的扩散运动和漂移运动都不会很显著,因此忽略载流子的扩散运动和漂移运动,即只考虑载流子的产生和复合(2)式简化为

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{n'}{\tau} \exp(-\alpha_{\text{opt}} x) + n(t) \alpha_{\text{av}} v_n - \frac{n(t)}{\tau_n}. \quad (5)$$

(5)式的解给出了电流丝头部高场区内距电流丝体 x 处,载流子浓度上升到 n 所需要的时间 t 的表达式:

$$t = \frac{1}{(\alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n)} \ln \frac{1 + (n/\eta n') \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n}{1 + (n_0/\eta n') \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n} \tau' \exp(\alpha_{\text{opt}} x), \quad (6)$$

式中 n_0 为开关体内热平衡载流子浓度。因此,电流丝头部高场区内距电流丝体 x 处,载流子浓度 $n(t)$ 要达到电流丝体内载流子浓度 n' 所需的时间为 t_0 为

$$t_0 = \frac{1}{(\alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n)} \ln \frac{1 + (1/\eta) \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n}{1 + (n_0/\eta n') \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n} \tau' \exp(\alpha_{\text{opt}} x). \quad (7)$$

因而距雪崩碰撞引起的粒子束头部 x 处的载流子表观传播速度为

$$v_{\text{obs}} = \frac{x}{t_0} = x \left(\alpha_{\text{av}} v_n - \frac{1}{\tau_n} \right) \left[\ln \frac{1 + (1/\eta) \chi \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n}{1 + (n_0/\eta n') \chi \alpha_{\text{av}} v_n - 1/\tau_n} \tau' \exp(\alpha_{\text{opt}} x) \right] \quad (8)$$

这一关系式应当仅对以下的区域成立： x 的最远处应该是以光速传播所能到达的地点， x 的最近处应该是载流子以饱和速度传播所到达的地点，也就是说，电流丝头部的高场碰撞电离区应在此区域之内。

下面，基于上述的理论分析进行数值计算，讨论光导开关在非线性工作时对各种参量的要求，以及各种参量的改变对电流丝传播速度的影响。

4 数值分析与讨论

在以下计算曲线中，每幅图中都画出了光导开关材料中的光速和载流子饱和漂移速度曲线。因为实验结果表明，光导开关在非线性工作时电流丝的速度应

处在光速和载流子饱和漂移速度之间，因而因各种参量变化引起的速度曲线与这两条曲线的交点给出了对该因素的限制范围，在此范围内这些速度变化曲线反映了各种参量对电流丝速度的影响。

1) 图 2(a) 是以 GaAs 的典型材料参量值计算的结果，图 2(b) 是把其中小距离内的情形放大的结果。

图中也给出了由 v_{max} 和 v_{min} 表示的实验观测电流丝速度的最大和最小值。由图可见对于不同的初始载流子浓度，确实存在表观速度大于载流子饱和漂移速度而小于光速的区域。计算中所采用的数据为： $\alpha_{\text{av}} = 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ， $\alpha = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ， $\tau_n = 1 \times 10^{-9} \text{ s}$ ， $\eta = 1 \times 10^{-3}$ ， $n' = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ， $v_n = v_s = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

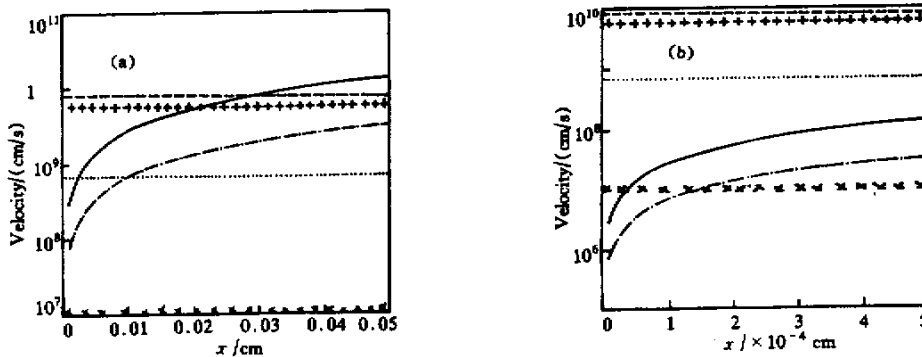


Fig. 2 The velocity between saturated drift velocity and speed of light determines high-field region. ----: speed of light; + + +: v_{max} ; ·····: v_{min} ; × × ×: saturated velocity; —: $n_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; ···: $n_0 = 10^7 \text{ cm}^{-3}$. (a) Dependence of virtual drift velocity on distance; (b) Enlarged figure of short distance region in Fig. 2(a)

由图所给出的数据还可以看出，高场电离区应在距雪崩碰撞引起的粒子束体前端 $1.6 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$ 范围内，考虑到实验观测到的电流丝速度变化，我们认为这个高场电离区应在雪崩碰撞引起的粒子束体前端 $120 \mu\text{m} \sim 220 \mu\text{m}$ 内。

2) 图 3 是载流子寿命对电流丝表观传播速度的影响，由图可以看出，雪崩碰撞引起的粒子束体内载流子寿命变化的影响没有碰撞电离区内载流子寿命变化的影响显著。当载流子的寿命大于几十皮秒后，载流子寿命的延长对电流丝表观传播速度几乎没有多大影响。但当电离区内载流子的寿命太短时，就无法形成电流丝。因此，当采用微电子材料处理技术改变光导开关材料中载流子的性质，以减小雪崩碰撞引起的粒子束体内载流子寿命或延长碰撞

电离区内载流子寿命时，可以增大电流丝表观传播速度，从而减小导通时间。这些技术包括采用强粒子束（高能中子、高能质子、 γ 射线、高能 X 射线）轰击光导开关材料，或者对开关材料进行不同浓度的掺杂来改变载流子的寿命。

3) 图 4 显示了碰撞电离系数和光吸收深度对载流子表观传播速度的影响，可以看出光吸收深度的变化对速度的影响不显著，而碰撞电离系数的变化对速度的影响很明显。当碰撞电离系数（因而碰撞电离区内电场值）超过一定值时才能满足产生电流丝的条件。同时，人为造成材料内电场的不均匀（例如，采用激光束聚焦照射或采用光纤点照射的照明方式、把光导开关制作成 n-i-n 或 p-i-n 结构、采用脉冲偏置电压）来产生局部高场也能提高电流丝的

速度, 加快开关的导通过程。

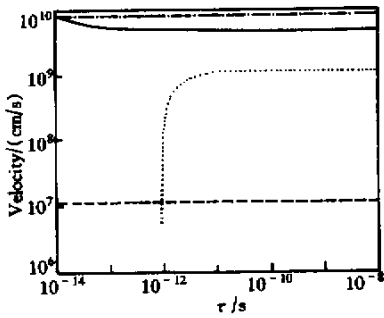


Fig. 3 The effect of lifetime of carriers on virtual drift velocity. ----- : τ in inozation region ; — : τ in streamer body ; ----- : speed of light ; - - - : saturation velocity

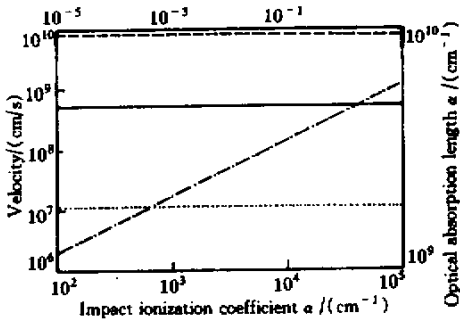


Fig. 4 The effect of impact ionization coefficient and optical absorption on virtual drift velocity. ----- : speed of light ; - - - : saturated velocity ; — : α_{opt} ; - - - : α_{av}

4) 图 5 所显示的是 $x = 170 \times 10^{-4}$ cm 处在不同初始载流子浓度和不同电离率情况下的等速曲线。所标出的数值为表观传播速度值, 最左和最右分别是饱和漂移速度和光速等速线。可以看出, 载流子可以以高于饱和速度的时间传播至此, 载流子的表观传播速度由初始载流子浓度和电离率二者共同决定, 可以达到 10^9 cm/s 的量级。载流子浓度高时所需的电离率(因而电场)可以小些。反之, 载流子浓度低时, 所需的电离率较大才能达到同样速度。

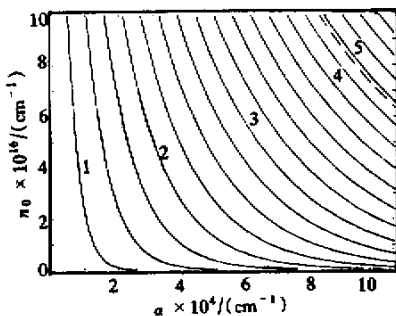


Fig. 5 The contour of drift virtual velocity determined by initial carrier concentration and impact ionization coefficient. 1 : 5.57×10^8 ; 2 : 1.11×10^9 ; 3 : 4.45×10^9 ; 4 : 7.23×10^9 ; 5 : 8.18×10^9

结论 当 GaAs 半导体光导开关以雪崩碰撞引起的粒子束形式放电时, 雪崩碰撞引起的粒子束头部的高场电离区发生在距雪崩碰撞引起的粒子束体 $120 \mu\text{m} \sim 220 \mu\text{m}$ 范围内, 载流子的表观传播速度可以达到 10^9 cm/s, 远大于载流子的饱和漂移速度, 这些计算结果与实验结果吻合。此外, 分析表明载流子的表观传播速度受初始载流子浓度、碰撞电离率、载流子寿命等因素的影响, 因此, 通过一定的技术控制这些参量, 有可能达到控制非线性高增益电流的上升时间, 进而改善光导开关输出电脉冲的特性。

参 考 文 献

[1] Shi Shunxiang , Wan Xianjun . Delay time of output pulse in nonlinear photoconductive semiconductor switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998 , 18 (3) : 365 ~ 368 (in Chinese)

[2] Kambour K , Kang S , Myles C W *et al.* . Steady state properties of lock-on current filaments in GaAs. *IEEE International Pulsed Power Conference* , 1999 . 791 ~ 794

[3] Kenney J S , Allen R A , Ludwig S *et al.* . The temporal development of instabilities in low light activated GaAs switches. *Proc. of the 1992 20th International Power Modulator Symposium* , 1992 . 320 ~ 323

[4] Zutavern F J , Loubriel G M , McLaughling D L *et al.* . Electrical and optical properties of high gain GaAs switches. *Proc. SPIE* , 1992 , 1632 : 152 ~ 159

[5] Zutavern F J , Loubriel G M , O' Malley M W *et al.* . Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive semiconductor switching. *IEEE Power Modulator Symposium* , 1992

[6] Loubriel G M , Zutavern F J , Mar A *et al.* . Longevity of optically activated , high gain GaAs photoconductive semiconductor switches. *IEEE International Pulsed Power Conference* , 1997 , 1 : 405 ~ 413

[7] Adams J C , Falk R A , Capps C D *et al.* . Characterization of current filamentation in GaAs photoconductive switches. *Proc. SPIE* , 1993 , 1873 : 10 ~ 20

[8] Loubriel G M , Zutavern F J , O' Malley M W *et al.* . Measurement of filament velocity and reduced trigger energy. *Proc. SPIE* , 1994 , 2343 : 21 ~ 31

[9] Schoenbach K H , Kenney J S , Allen R A *et al.* . Development of current filaments in photoconductive GaAs switches. *Proc. SPIE* , 1993 , 1873 : 21 ~ 26

[10] Donaldson W , Kingsley L . Optical probing of field dependent effects in GaAs photoconductive switches. *Proc. SPIE* , 1990 , 1378 : 226 ~ 236

[11] Dougal R A , Hudgins J L , Bailey D W . Optical figure of merit for high gain photoconductive switching. *Proc. of the 20th International Power Modulator Symposium* , 1992 . 301 ~ 304

[12] Hudgins J L , Bailey D W , Dougal R A *et al.* . Streamer model for ionization growth in a photoconductive power switch. *IEEE Transactions on Power Electronics* , 1995 , 10 (5) : 615 ~ 620

The Rapid Turn-on Characteristics in Nonlinear Photoconductive Semiconductor Switches

Zhang Tongyi Shi Shunxiang Gong Renxi Sun Yanling
(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071)
(Received 13 November 2000; revised 26 March 2001)

Abstract: The rapid turn-on process of nonlinear photoconductive semiconductor switch is always associated with the formation of filamentary current. Some turn-on characteristics of nonlinear photoconductive semiconductor switches are analyzed based on the assumption that the mechanism of the turn-on in photoconductive semiconductor switches is the streamer discharge. The results, with carrier lifetime, optical absorption length, impact ionization coefficient, initial carrier concentration considered, fit with the experimental results well. This discussion corroborates the assumption and is helpful to the full understanding of the physical processes occurred in nonlinear PCSS. Some methods of improving and controlling the operational characteristics of PCSS are also given.

Key words: photoconductive semiconductor switch; filamentary current; lock-on; streamer discharge; saturation drift velocity; turn-on process

热烈庆贺浙江大学光学工程创立 50 周年 五十年发展 五十年辉煌 ——庆祝浙江大学光学工程创立 50 周年

1952 年,国家教育部根据中国科学院及著名光学专家王大珩院士的倡议,结合全国高校院系调整,决定在浙江大学设置国内第一个光学仪器专业。五十年风雨,五十年发展,光电信息工程学系作为浙江大学一支最出色的战斗集体,在教学、科研、人才培养和学科建设诸方面,成果累累,长盛不衰,为国家作出了贡献,为学校争得了荣光;在母校栩栩生辉的光环中,含有我们光电系全体师生用生命激励出来的耀眼光芒。光电系无愧为浙大之光,中国之光。

浙江大学光学工程 50 周年庆祝大典将于 2002 年 5 月 6、7 日在浙江大学求是园举行。诚邀在光电系(光仪系)工作、学习过的各位校友、贵宾及有关亲朋好友积极参加。

● 庆典活动主要内容有:

50 周年纪念碑揭幕;50 周年国内外学术报告;50 周年校友论坛;50 周年文体大奖赛;50 周年庆典活动宴会。

● 50 周年庆典活动联系方式:

通讯地址 杭州浙江大学光电信息工程学系 邮政编码 310027 网址 <http://www.zjuopt.com>

信息学院副院长、光电系主任 刘旭 0571-87951576、1306501881

信息学院党委副书记、光电系总支书记 曾广杰 87951195、13606610186

光电系副主任 刘向东 87951576、13003632031

光电系副主任 徐之海 87951182、13003660362

光电系办公室主任 邱文法 87951197、13003679084

E-mail: qw@moi-lab2.zju.edu.cn