

半绝缘 GaAs 光电导开关非线性电脉冲 超快上升特性研究^{*}

施 卫[†] 屈光辉 王馨梅

(西安理工大学物理系, 西安 710058)

(2008 年 3 月 22 日收到, 2008 年 7 月 7 日收到修改稿)

利用流体模型对光生载流子的输运进行了模拟研究, 结果表明载流子在输运过程中形成的光激发电荷畴是产生电脉冲超快上升特性的主要原因. 对光激发电荷畴的形成和吸收过程的进一步研究表明: 1) 形成过程中的光激发电荷畴增强了电子的浓度梯度; 2) 光激发电荷畴在被阳极吸收的过程中, 光电导开关偏置电压的快速下降能促进电流上升速度. 光激发电荷畴的形成和吸收两大过程共同作用下, 形成了电脉冲的超快上升特性.

关键词: 光电导开关, 非线性模式, 光激发电荷畴, 上升时间

PACC: 7220H

1. 引 言

半导体光电导开关(PCSS)是利用超快脉冲激光器与光电导体(如 Si, GaAs, InP 等)相结合形成的一类新型开关器件, 具有独特的性能: 快速响应(皮秒上升/下降时间), GHz 的重复率, 无触发晃动, 寄生电感电容小, 触发隔离, 动态范围大, 结构灵活(适配于各种传输线结构)等特点. 其耐高压及大的电流承载能力使之不但在超高速电子学而且在大功率脉冲产生与整形技术领域成为传统开关(间隙放电、闸流管及结器件)最有希望的换代器件. 并在新兴的 THz 技术^[1-3]、高速电子学、超宽带雷达等高新科技领域具有广阔的应用前景.

1987 年, 美国 Loubriel 等人发现高压偏置下的 GaAs 光电导开关中存在非线性工作模式即 Lock-On 模式. 随后的大量实验研究显示强场下 PCSS's 的非线性工作模式可以分为引发阶段、维持阶段和恢复阶段. 其典型特征有: 1) Lock-On 工作模式具有电场阈值和光能阈值; 2) 触发光脉冲与电脉冲之间存在时间延迟; 3) 具有超快电脉冲上升沿, 其上升时间甚至比光脉冲上升时间短; 4) 维持阶段存在稳定的

Lock-On 电场; 5) 开关中存在丝状电流, 并伴随发光. 对非线性模式下超快上升沿的实验研究表明^[4-7]: 在强光触发条件下, 光电导开关非线性电脉冲上升时间随者偏置电压的升高而缩短, 当偏置电压达到 60 kV/cm 时, 上升时间可达亚纳秒量级. 作为非线性模式的主要特征之一, 超快上升时间具有重要的应用价值. 前人提出过多种理论模型来解释光电导开关非线性现象. 先后提出的理论模型有本征碰撞电离^[8]、深能级碰撞电离^[9-11]、依赖于电场的载流子俘获和发射^[12]、集团碰撞电离^[13]、不均匀接触势垒起伏^[14]、双载流子注入^[15, 16]、光激发电荷畴^[17-20]等. 这些模型都能够解释部分非线性模式的特征, 难以对非线性模式的物理机理进行全面的解释. 其中光激发电荷畴模型能够较好地解释非线性模式的多种典型现象. 本文在光激发电荷畴的基础上对超快上升特性进行研究.

2. 光电导开关输出电流的形成

光生载流子在光电导体内的定向漂移形成光电导体内的传导电流; 同时电子和空穴的分离在光电导体内形成随载流子漂移而快速变化的内建电场,

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50837005, 10876026), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(批准号: 2007CB310406)和西安理工大学优秀博士论文基金资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

导致位移电流.光电导开关内同时存在传导电流和位移电流.光电导开关内的光生载流子对外电路产生影响时,才能够向外电路产生输出.在光电导开关内,载流子连续性方程和电流可以用表示为

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} + \frac{n(x,t) - n_0}{\tau} = g_0(x,t) - \frac{\epsilon}{4\pi e} \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial x \partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon}{4\pi} \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} + j(x,t) = I(t), \quad (2)$$

$$j(x,t) = en(x,t)V(E(x,t)) + eD(E(x,t)) \frac{\partial n(x,t)}{\partial x}, \quad (3)$$

其中 $I(t)$ 为全电流, $j(x,t)$ 为电子形成的传导电流, $n(x,t)$ 为电子浓度, $E(x,t)$ 为电场强度, e 为电子电量, $V(E(x,t))$ 为电子漂移速度, $D(E(x,t))$ 为扩散系数, g 为电子产生率, n_0 为本征载流子浓度, ϵ 为介电常数, τ 为载流子寿命. (1) 式为载流子连续性方程, (2) 式为全电流方程, (3) 式为电子形成的传导电流, 右侧第一项为漂移电流, 第二项为扩散电流.

光电导开关典型的实验电路如图 1 所示. 电路由直流高压源、储能电容、微波传输线、衰减器、光电导开关和负载组成. 其中的连接线均为阻抗 50Ω 的微带线或同轴线. 负载为阻抗 50Ω 的示波器.

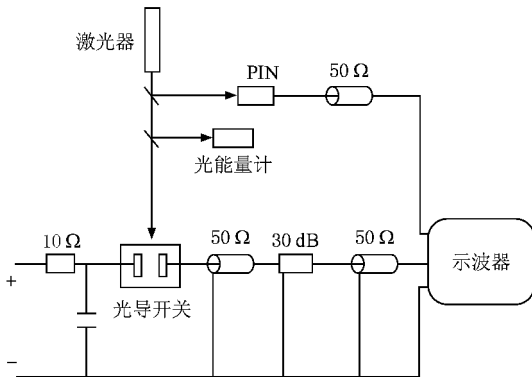


图 1 光电导开关实验电路图

在传输线无耗散假设下,光电导开关电极上的电流即输出电流.电极上的全电流由感生电流和传导电流组成.其中感生电流是光电导体内的位移电流引起的,而传导电流是电极吸收载流子形成的.根据文献 [21],由于横向光电导开关寄生电容小,其感生电流可以忽略不计,同时由于 GaAs, InP 等 III-V 族半导体材料的电子迁移率远大于空穴,因此空穴

电流也可以忽略.在电极与光电导体界面应用 (2), (3) 式有

$$I(t) \approx j(x_0, t) = en(x_0, t)V(E(x_0, t)), \quad (4)$$

其中 $I(t)$ 为全电流, $j(x_0, t)$, $n(x_0, t)$ 分别为 x_0 点传导电流和电子浓度, $V(E(x_0, t))$ 为电子在 x_0 点的漂移速度.

3. 电子浓度的分布

根据 (4) 式,电子浓度是输出电流的定性因素之一. GaAs 是 III-V 族半导体材料,其能带结构中具有一个卫星谷.卫星谷中电子有效质量大、迁移率低.在温度不太高,场强不太大的条件下,电子主要位于主能谷中,在场强增大或温度升高时,电子能够向卫星谷转移,这就是电子转移效应.在 GaAs 光电导开关中,电子转移效应对载流子的强场输运有重要的影响,是强场负阻效应的主要原因.

GaAs 电子速场特性可以用经验表达式描述^[22]:

$$V = \frac{E_p \mu_{r0} + V_{ns} \frac{|E_p|^4}{E_{cr}^4}}{1 + V_{ns} \frac{|E_p|^4}{E_{cr}^4}}, \quad (5)$$

其中 V_{ns} 为电子饱和漂移速度, μ_{r0} 为 GaAs 电子低场迁移率, E_{cr} 为负阻效应起始电场, E_p 电场强度.

根据 (5) 式得到的 GaAs 速场特性曲线如图 2 所示.电子漂移速度随电场增大并在电场为 3.2 kV/cm 时达到最大值,当电场进一步增强时,电子漂移速度反而下降,最终在电场为 20 kV/cm 处达到饱和漂移速度 10^7 cm/s .

在文献 [17—20] 中对 PCSS's 中光激发畴的存在进行了详细论证.虽然畴形成的条件要求 $nL \geq 10^{12}$ (其中 n 为器件载流子浓度, L 器件长度),在半绝缘 GaAs 光电导开关内,本征载流子浓度非常低,然而在强光触发条件下,光生载流子浓度可达 $10^{19} / \text{cm}^2$ 以上.光生载流子补充了本征载流子的不足,从而使畴生成的条件得到满足.

光电导开关内,电子到达阳极时的浓度分布由触发光脉冲的波形、横模和输运过程决定.设触发光脉冲为高斯分布,聚焦后照射到光电导体中央,电极间隙 3 mm ,偏置电场方向为 X 正向.光斑直径小于光电导开关间隙,光功率为 1 mJ ,偏置电场为 6 kV/cm .

从 Boltzmann 输运方程出发,假定抛物线形式的能带结构,Blotekjaer 得出了近似 Boltzmann 输运方程

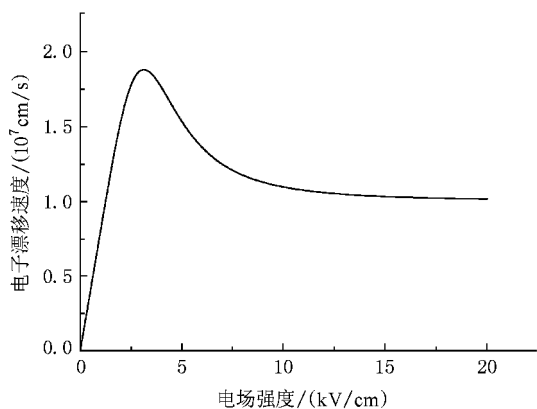
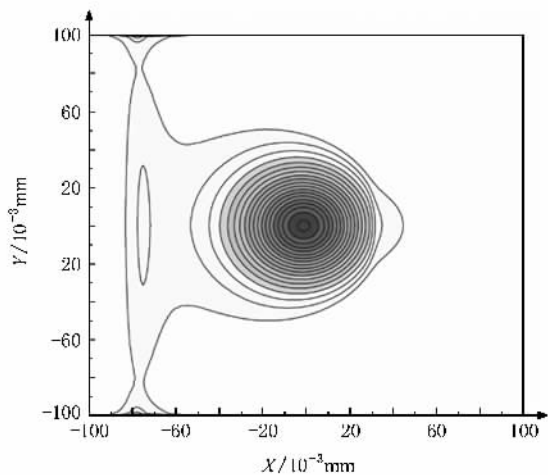


图2 GaAs 电子速场特性曲线

的流体模型. 流体动力学模型(HDM)作为玻尔兹曼(Boltzmann)输运方程较好的近似,在模拟器件尺寸大于 $1 \mu\text{m}$ 时与蒙特卡罗方法(MC)符合得很好,而计算量比 MC 方法小得多,所以得到越来越多的应用^[23, 24]. 利用流体模型对载流子的输运进行模拟. 图3显示的是在光触发 3 ns 后电子的浓度分布. 电子在负阻效应的作用下分离出一个电子团簇并在输运过程中形成畴. 其余的电子会在电荷分离形成的屏蔽场的作用下停滞,直到屏蔽场消失. 输出电脉冲上升沿仅与第一个畴的前沿载流子浓度分布有关.

图3 激光触发 3 ns 时的电子浓度分布(X 正向为偏置电场方向)

畴的形成需要偏置电场大于负阻效应起始电场,而且电场具有足够的非均匀性. 由于光生载流子是成对出现的,即使在强光照射条件下,在光照初期,由于光生电子和空穴没有充分分离,内建电场很弱,载流子以均匀的速度分别向电极漂移. 随着电荷分离,内建电场逐渐增强,当电场波动满足成畴条件

时,电子才迅速会形成光激发电荷畴. 光激发畴达到稳态后,便以稳定的速度向阳极漂移,并在漂移的过程中浓度分布不变.

因此可以将输运过程根据内建电场的强弱分为三个阶段,第一个阶段是光照初期,弱内建电场阶段. 在这一时段,光照未停止,不断有光生载流子在触发点产生,同时新产生的光生载流子在偏置电场的作用下向电极漂移. 当第一阶段结束时,最前方的电子到达电子浓度最高点的距离可表达为

$$X \approx V(E_B)\Delta t + D/2, \quad (6)$$

其中 D 为光斑直径, Δt 为第一阶段持续的时间, $V(E_B)$ 为偏置电场为 E_B 时的电子漂移速度. 由(6)式可知,在第一阶段结束时,电子漂移速度越大,浓度梯度越小.

第二阶段为畴形成阶段. 在这一阶段,内建电场引起的较强的非均匀电场,并由负阻效应引起电子漂移速度不均匀,造成电子积累,进一步增强内建电场,直至内建电场大于负阻效应截止电场 20 kV/cm 时畴的生长停止. 畴的形成是一个非常快的过程,一般认为在几个 ps 的时间内就可以完成. 由于畴的积累层在畴内电子的后沿,而且畴形成期间畴内电场变化非常快,畴前沿的电子来不及积累就进入高场阶段(电场大于 20 kV/cm),各点速度均匀且浓度保持第一阶段结束时的分布.

第三阶段为光激发电荷畴向阳极漂移阶段. 这一阶段,稳态的光激发畴畴内电子浓度分布在输运过程中不变,最终被阳极吸收.

载流子浓度的空间分布主要由光激发电荷畴形成前的输运过程决定,电子漂移速度和触发光斑大小决定了电子浓度上升沿的梯度,快速形成的光激发电荷畴进一步增强电子浓度梯度,直到电子被阳极吸收. 电子漂移速度越快,则畴前沿电子浓度梯度越小,导致输出电脉冲上升沿缓慢. 随着偏置电场的提高,电子漂移速度降低,畴内电子前沿浓度梯度增大,输出电脉冲上升沿加快.

4. 吸收过程对上升速度的影响

根据图1所示光电导开关实验电路,在光电导开关导通过程中,可以认为开关上的偏置电压与负载电压为串联关系.

$$U_C = U_{\text{PCSS}} + U_L, \quad (7)$$

U_C 为电容电压, U_{PCSS} 为光电导开关上的偏置电压,

U_L 示波器上的电压,即输出电压.

光电导开关偏置电场大于 3.2 kV/cm 时,随着光生载流子被电极吸收形成电流, U_L 逐渐增大, U_{PCCS} 则下降. 由于 GaAs 材料的负阻效应,偏置电场在负阻效应区间的下降反而导致电子漂移速度的上升,引起电流非线性上升.

设电子的浓度分布为三角形分布,偏置电场为 6 kV/cm 用时域有限差分方法对输出电流进行计算,结果如图 4 所示.

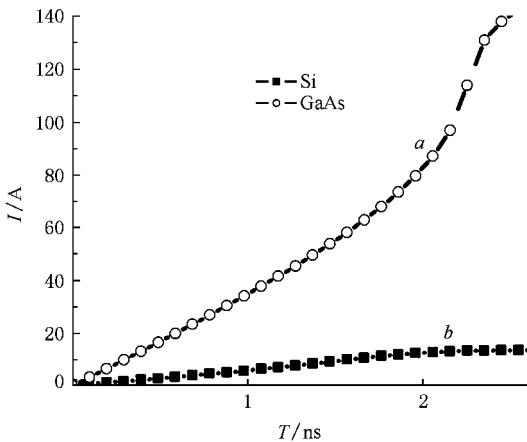


图 4 空间分布相同的电子被阳极吸收产生的电流 a 为 GaAs, b 为 Si

计算结果表明:在适当的偏置电场和触发光条件下,转移电子效应与光电导开关导通过程中电路

中的电场振荡之间具有正反馈关系,该机理能够导致电流快速上升.图 4 显示了 GaAs 光电导开关电子在被阳极吸收的过程中表现出的非线性快速增长.

5. 结 论

通过对横向光电导开关电流形成机理的分析,认为阳极吸收电子产生的传导电流就是光电导开关的输出电流.即阳极对电子的吸收速率决定输出电流.本文分别分析了输运过程对电子浓度分布的影响和电路中的电场振荡对电子漂移速度的影响,认为非线性超快上升沿的形成原因有两方面:

1. 光激发电荷畴 通过数值模拟证明在非线性工作模式下,电场阈值和光能阈值条件满足产生光激发电荷畴的产生条件,电子在负阻效应的作用下分裂为两团,并形成光激发电荷畴.光激发电荷畴的出现使电子的浓度梯度随着畴的生长而增长,并当畴达到稳态后便保持到被电极吸收.

2. 转移电子效应 在光电导开关导通过程中,开关的偏置电压和负载电压(即输出电压)存在动态分压关系.开关偏置电场随着负载电压的变化而变化.当偏置电场的变化范围位于负阻效应区时,转移电子效应使电流随着偏置电压的降低而非线性增强,进而更快的减小开关偏置电场.转移电子效应与电场振荡之间的正反馈进一步加快了输出电流的上升速度.

- [1] Shi W ,Dai H Y ,Sun X W 2003 *Chinese Optic Letter* **1** 553
- [2] Cao J C ,Lei X L ,Li A Z ,Liu H C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2524
- [3] Cao J C ,Lei X L 2003 *Phys. Rev. B* **67** 085309
- [4] Cao J C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 237401
- [5] Zutavern F J ,Loubriel G M ,Buttram M T 1991 *IEEE MTT-S Digest* 377—380
- [6] Zutavern F J ,Loubriel G M ,O'Malley M W 1990 *SPIE* **1378** 271
- [7] Zutavern F J ,Loubriel G M ,O'Malley M W *et al* 1991 *IEEE 8th Pulsed Power photoconductive* 23—28
- [8] Kingsley L E ,Donaldson W R N 1993 *IEEE Electron Devices* **40** 2344
- [9] Loubriel G M ,Zutavern F J ,Hjalmarsen H P 1989 *7th IEEE Pulsed Power Conference* ,Monterey ,CA 365—367
- [10] Capps C D 1992 *SPIE Vol. 1632 Optically Activated Switching II* 254—261
- [11] Yee J H ,Khanaka G H ,Drude  *et al* 1992 *SPIE Vol. 1632 Optically Activated Switching* 29—31
- [12] Braun C ,Burke T ,White W T *et al* 1990 *Proc. 19th IEEE Power Modulator Symp.* 375—384
- [13] Hjarmarson H P ,Loubriel G M ,Zutavern F J *et al* 1999 *IEEE Pulsed Power Conf.* ,Monterey ,CA ,Proc. 12th 299—302
- [14] Joshi R P ,Kayasit P ,Islam N E *et al* 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3833
- [15] Brinkmann R P 1992 *IEEE 20th Power Modulator Symposium* , 316—319
- [16] Brinkmann R P ,Schoenbach K H ,Mazzola M S *et al* 1992 *SPIE Vol. 1632 Optically Activated Switching II* 262—273
- [17] Shi W ,Liang Z X 1999 *Chinese Journal of Semiconductors* , **20** 1 (in Chinese) [施 卫、梁振宏 1999 半导体学报 **20** 1]
- [18] Shi W ,Zhao W ,Zhang X B ,Li E L 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 867 (in Chinese) [施 卫、赵 卫、张显斌、李恩玲 2002 物理学报 **51** 867]
- [19] Shi W 2001 *Chinese Journal of Semiconductors* **22** 1481 (in Chinese) [施 卫 2001 半导体学报 **22** 1481]
- [20] Shi W ,Tian L Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 202103

- [21] Qu G H , Shi W 2006 *Acta . Phys . Sin .* **55** 6068 (in Chinese) [屈
 光辉、施 卫 2006 物理学报 **55** 6068] ED-40 2344
- [22] Kingsley L E , Donaldson W R 1993 *IEEE Trans . Electron Devices* , [23] Blotekjaer K 1970 *IEEE Transactions on Electron Devices* **17** 382
- [24] Grasser T , Tang T W 2003 *Proc of IEEE* **91** 2512274

Ultrafast rising of output electric impulse of lock-on model of semi-insulated GaAs photoconductive switches^{*}

Shi Wei[†] Qu Guang-Hui Wang Xin-Mei

(Department of Physics , Xi'an University of Technology , Xi'an 710058 , China)

(Received 22 March 2008 ; revised manuscript received 7 July 2008)

Abstract

In the lock-on model of semi-insulating GaAs photoconductive switches , the output current pulse has ultra-fast rise character , the rise time can be even less than that of the laser pulse . Fluid model is used to simulate the transport of photo-induced carrier . The results show that photo-activated charge domain formed in the transport process of carriers is the main cause of ultra-fast rise time . Further studies on the establishment of photo-activated charge domain and the absorption process show : 1 . The photo-activated charge domains during the establishment enhance the electron density gradient . 2 . When the photo-activated charge domains are absorbed by the anode , rapid decline of bias electric voltage will accelerate the rise rate of output current pulse . Due to the two processes , the output current pulse in the lock-on model shows ultra-fast rise character .

Keywords : photoconductive switches , lock-on , optically activated charge domain , rise time

PACC : 7220H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50837005 , 10876026) , the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310406) , and the Foundation of Outstanding Doctoral Thesis of Xi ' an University of Technology , China .

[†] E-mail : swshi@mail.xaut.edu.cn