

# 半绝缘 GaAs 光电导开关的瞬态热效应<sup>\*</sup>

施 卫<sup>1)2)†</sup> 马湘蓉<sup>1)</sup> 薛 红<sup>1)</sup>

1) (西安理工大学应用物理系, 西安 710054)

2) (西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 7 月 19 日收到; 2009 年 12 月 7 日收到修改稿)

实验用波长 1064 nm, 触发光能为 1.0 mJ 的激光脉冲触发电极间隙为 4 mm 的半绝缘 GaAs 光电导开关, 当光电导开关的偏置电压达到 3800 V 时, 开关进入非线性 (lock-on) 工作模式, 在偏置电场和触发光能不变的条件下, 开关输出稳定的非线性电脉冲, 1500 次触发后 GaAs 开关表面出现因丝状电流引起损伤的痕迹. 分析认为: 在一定触发光能和电场阈值条件下, 开关芯片内存在两种瞬态热效应: 热弛豫效应和光激发电荷畴-声子曳引效应. 热弛豫时间很短, 在皮秒甚至亚皮秒量级, 热弛豫过程导致了热传导的弛豫行为; 当光激发电荷畴以  $10^7$  cm/s 的速度从阴极向阳极渡越时, 在这两种效应的作用下使得开关芯片瞬态温度变化发生了弛豫振荡现象. 光激发电荷畴-声子曳引效应在位错运动方向上传播, 声子流携带的热能集中在移动的平面内, 使得移动区域温度升高, 移动轨迹经多次叠加累积呈现出丝状的损伤痕迹.

**关键词:** 半绝缘 GaAs 光电导开关, 热弛豫效应, 光激发电荷畴-声子曳引效应, 丝状电流

**PACC:** 7220H

## 1. 引 言

半导体光电导开关 (photoconductive semiconductor switch, PCSS) 是利用超快脉冲激光器与光电导体 (如 GaAs, InP 等) 相结合形成的一类新型器件. 在超高速电子学、脉冲功率技术、THz 技术等领域具有广阔的应用前景. 特别是当要兼顾高重复频率、高功率、超短脉宽、低晃动时, 光电导开关是最优选择<sup>[1-8]</sup>.

半绝缘 GaAs 光电导开关通常工作在线性模式, 当偏置电场和触发光能达到一定阈值时, 开关工作于非线性模式, 表现出高增益和锁定 (lock-on) 等特性<sup>[9]</sup>. 虽然 GaAs 光电导开关有良好的开关性能, 但工作于非线性模式时往往伴随着丝状电流, 导致开关容易出现热击穿而引起损坏. 这就制约了 GaAs 光电导开关在高电压、强电流条件下的应用<sup>[9,10]</sup>. 分析了触发瞬态过程中开关的热效应, 认为半绝缘 GaAs 芯片内存在两种瞬态热效应: 热弛豫效应和光激发电荷畴-声子曳引效应, 并利用这两种

瞬态热效应机理分析了丝状电流的一些特性.

## 2. 实验与结果

### 2.1. 开关结构与性能

实验所用的半绝缘 GaAs 光电导开关为横向型结构, 材料中载流子浓度  $n \approx 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>, 暗态电阻率  $\rho > 5 \times 10^7$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , 电子迁移率  $\mu > 5500$  cm<sup>2</sup>/V·s. 开关芯片厚度为 0.6 mm, 两电极间隙为 4.0 mm, 本征击穿强度约 250 kV/cm.

### 2.2. 触发激光的选择

GaAs 的禁带宽度为 1.42 eV, 对应的本征吸收限为 875 nm, 在本征吸收光谱范围内 GaAs 的吸收深度约 1  $\mu\text{m}$ . 考虑到光吸收系数越大, 吸收深度就越浅, 在半导体表面光生电流密度就越大, 减小了电流通路的横截面积, 降低了光电导开关所能传导的总电流, 从而降低了开关的输出功率. 另外, 对于吸收深度浅的光脉冲触发, 还容易引起开关表面的

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB310406), 国家自然科学基金 (批准号: 50837005 和 10876026), 电力设备电气绝缘国家重点实验室 (批准号: EIPE09203) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

沿面放电. 对于本实验所使用的厚度为 0.6 mm 的 GaAs 光电导开关芯片, 采用波长 1064 nm 的光脉冲触发, 对应的吸收深度近 1 mm, 即光生载流子能够较为均匀的产生在芯片中, 使瞬态光电流尽可能均匀地通过开关芯片的横向截面, 以克服电流过于集中, 有利于避免沿面放电和提高开关的通流能力<sup>[11]</sup>. 因此, 实验中选用波长为 1064 nm、光脉冲能量可调谐的 Nd: YAG 脉冲激光器作为触发光源, 其激光脉冲宽度为 15 ns.

### 2.3. 实验测试

测试电路如图 1 所示, GaAs 开关经 60 dB 衰减器与 Lecory 示波器相接. 偏置电压从 500 V 开始以步长 50 V 电压逐渐增加, 进行实验测试. 当电压升至 3800 V 时, 开关开始进入稳定的非线性工作模式, 图 2 为连续触发 100 次重叠记录的电脉冲波形. 可以看到开关虽然工作在线性模式, 但重复性和稳定性良好. 在保持实验条件不变的情况下, 每隔 1 s 时间对开关进行触发一次, 观察输出电脉冲的变化. 约触发 1500 次时, 开关的性能发生了较为明显的变化, 表现在开关偏置电压下降, 输出波形紊乱, 开关芯片有损伤痕迹, 如图 3 所示. 实验前后开关暗态电阻的测试数值分别为 500 M $\Omega$  和 20 M $\Omega$ , 绝缘电阻下降.

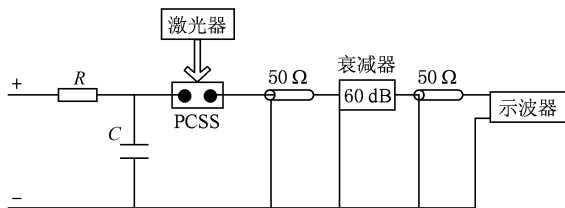


图 1 PCSS 测试电路图

### 3. 瞬态热效应分析

在一定触发光能和电场阈值条件下, 开关芯片内存在两种瞬态热效应: 热弛豫效应和光激发电荷畴-声子曳引效应.

#### 3.1. 热弛豫效应

GaAs 半导体中产热机理是一个两步过程: 从电子到纵向光学声子, 再从纵向光学声子到声学声子, 声学声子是决定热传导的主要模式. 半绝缘

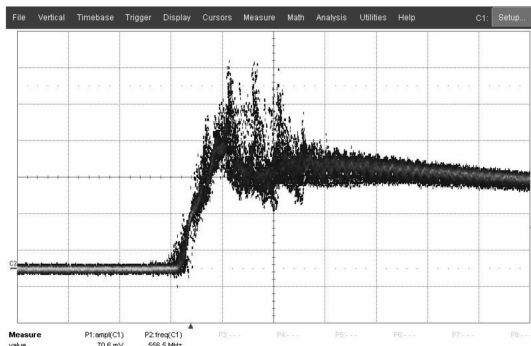


图 2 触发 4 mm 间隙开关 100 次输出波形



图 3 触发 4 mm 间隙开关 1500 次出现丝状电流

GaAs 光电导开关的热学行为和电子输运行为是高度耦合的, 开关热作用瞬时时间达到了皮秒甚至亚皮秒量级时, 弛豫行为就在热传导过程中起到了关键作用. GaAs 材料中存在着很强的非平衡载流子弛豫行为<sup>[12,13]</sup>, 这些弛豫过程间接引发了芯片内热传导的弛豫行为. 表 1 给出半导体中非平衡载流子弛豫的一些基本过程及其时间尺度<sup>[14]</sup>, 开关瞬态过程中的延迟行为是由于这些过程的相互作用所需的有限时间引起的. 可用波动导热理论来描述瞬态的传热过程, 波动型(双曲型)热传导方程为<sup>[15]</sup>

$$\rho c_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right] = \nabla \cdot k \nabla T(r, t) + Q(r, t) + \tau \frac{\partial Q(r, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

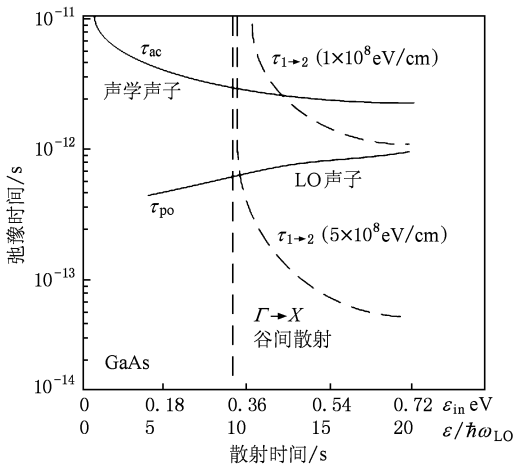
其中,  $Q$  是体积热源,  $\rho$  是电阻率,  $c_p$  是热容,  $\kappa$  是热导率,  $\tau$  是延迟时间, 代表声子碰撞所需要的时间.

实验用波长 1064 nm 的脉冲激光照射开关 GaAs 芯片, 光激发的导带电子和价带空穴均通过辐射或无辐射跃迁的复合过程回到基态. 这些载流子之间处于热平衡, 但与声子是非平衡的, 这种情况

表 1 半导体中非平衡载流子弛豫的一些基本过程及其时间尺度<sup>[14]</sup> (单位: s)

微观过程	特征时间	微观过程	特征时间
载流子-载流子散射	$10^{-15}—10^{-12}$	载流子扩散(0.1 $\mu\text{m}$ )	$10^{-11}$
谷内散射	$\sim 10^{-13}$	俄歇复合	$\geq 10^{-10}$
载流子-光学声子散射	$> 10^{-12}$	辐射复合	$\geq 10^{-9}$
光学声子-声学声子作用	$10^{-11}$	晶格热扩散(1 $\mu\text{m}$ )	$10^{-8}$

下的载流子有比晶格点阵更高的温度,处在准热平衡.热载流子的热弛豫时间取决于散射过程的性质和散射过程的强度,GaAs 半导体弛豫时间和散射时间关系<sup>[16]</sup>,如图 4 所示.由图 2 可见,连续触发 100 次开关输出的振荡电脉冲波形,说明开关触发进入非线性工作状态,开关体内热电子由于雪崩倍增,其浓度比线性状态时载流子的浓度大 3—5 个数量级.电子-电子相互作用达到平衡的弛豫时间小于载流子寿命,在热弛豫效应与复合的竞争中,体内电子的能量及浓度将达到稳定的热平衡状态,振荡逐渐消失并进入导通维持状态.因此,输出电脉冲呈现出主峰过后周期性的减幅振荡现象,并随着时间的推移振荡逐渐消失,最后进入稳定的 lock-on 状态.

图 4 弛豫时间和散射时间的关系<sup>[16]</sup>

GaAs 材料为多能谷结构,电子在两个能谷中的分配不仅决定于外加电场,也与晶格的温度有关,较高的晶格温度有利于电子从能量较低的主能谷向能量较高的子能谷转移.在平衡条件下,半导体中的自由电子和空穴遵循费米-狄拉克分布,而声子遵循玻色-爱因斯坦分布. GaAs 开关芯片热导率通常是通过载流子的运动、晶格振动以及电子-空穴对形成的扩散三个输运机理贡献的总和.晶格振动可视为携带热能的声子沿温度梯度的运动过程,且能量弛豫率又受到在平衡过程中产生的非平衡声子

的弛豫率的限制,能量弛豫时间通常大于动量弛豫时间.因此,实验中在一定偏置电压和触发激光条件下,由于芯片内部热弛豫效应作用, GaAs 芯片晶格温度变化较小.可见, GaAs 开关在非线性工作模式下,热弛豫效应可以部分缓解丝状电流对开关芯片的损伤,实验中 GaAs 开关经 1500 次触发后性能才发生了明显变化也说明这点.

### 3.2. 光激发电荷畴-声子曳引效应

#### 3.2.1. 声子曳引效应

自从在低温锗中发现了电子和声子的相互曳引效应后, Herring 在理论上予以了解释<sup>[17]</sup>. 随后证实了在金属、合金、其他半导体中也存在电子和声子的相互曳引效应<sup>[17]</sup>. 如果有一个沿特定方向流过晶体的高密度电子流,由于电子-声子散射,在该方向上将发射大量声子,这些声子与电子一起流动形成电子曳引的声子流,同样,当晶体中某一特定方向有声子流时,声子流可以曳引电子,引起电子由晶体的一端流向另一端,这就是声子曳引效应. 开关芯片内声子曳引热能与声子散射强度有关,通过声子-声子散射、声子-光子散射和声子-缺陷散射的相互作用,声子曳引热能起着很大作用. 声子-电子散射会减少声子热能,相比于声子-声子以及声子-缺陷的散射,声子-电子的散射对声子曳引热能有更强的影响<sup>[18]</sup>. 芯片内总热能为扩散热能与声子曳引热能之和:  $S_{\text{total}} = S_{\text{diff}} + S_{\text{drag}}$ ,  $S_{\text{drag}} \propto C_v$ ,  $C_v$  是晶格比热.

在处于平衡态的 GaAs 晶体中,声子密度各处均匀,声子向各方向运动的概率相等,因此内部没有净的声子流.但若固体处在具有温度梯度的非平衡态下,朝温度降低的方向就会有净的声子流,处在声子流中的载流子除了与声子碰撞,发生动量和能量交换外,也会受到定向声子流的曳引,同载流子在电场中获得加速度一样,在温度梯度的影响下,载流子的漂移速度也会升高.当开关芯片内存在温度梯度时,因为高温侧声子的平均数多,产生了由高温侧流向低温侧的声子流,这种热流方向的

声子动量因碰撞而传给电子,形成了和声子同方向的电子流,导致声子曳引电子流效应<sup>[19]</sup>.这样,除了温度梯度引起的载流子热扩散电流外,芯片内还存在由于声子流对载流子曳引产生的附加电流,这将在开关内产生附加的温差电场.

设在开关芯片内一定方向有温度梯度  $\frac{dT}{dx}$ ,则在此方向存在声子流,令声子漂移速度为  $v_{ph}$ ,与温度梯度  $\frac{dT}{dx}$  成比例.处于声子流中的载流子,在声子曳引下,电子也随声子流具有定向速度  $v_{ph}$ ,随着电子的流动,芯片一边堆积负电,另一边显正电,在芯片内部建立起附加温差电场  $E_{ph}$ .通过计算,可得声子的漂移速度<sup>[20]</sup>

$$v_{ph} = -\frac{1}{3} \frac{\tau_{ph}}{T} \frac{dT}{dx} v_s^2, \quad (2)$$

和附加温差电场<sup>[20]</sup>

$$E_{ph} = \mp \frac{1}{3} \frac{mv_{ph}^2}{eT} \frac{\tau_{ph}}{\tau} \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

式中,负号、正号分别对应电子和空穴,  $v_s$  为声子平均速度,  $\tau_{ph}$ ,  $\tau$  分别为声子、电子的平均自由时间,即两次相继碰撞之间的平均时间.

实验中用波长为 1064 nm 的脉冲激光照射开关 GaAs 芯片时,将在芯片被照射表面附近产生大量的光激发载流子,在达到一定的偏置电场时,载流子数发生雪崩倍增,芯片体内曳引效应增强,将会出现声子曳引峰<sup>[21]</sup>.由于受载流子浓度和温度的影响,芯片内产生的附加温差电场会发生变化,使得开关总电场出现波动.

### 3.2.2. 光激发电荷畴-声子曳引效应

在非线性工作模式下, GaAs 光电导开关材料每吸收一个光子将有  $10^3-10^5$  电子-空穴对产生,芯片内有“光激发电荷畴”生成<sup>[22-25]</sup>,引发载流子雪崩碰撞电离,伴随有丝状电流出现.

光激发电荷畴内光生电子-空穴对浓度可高达  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上,电子、空穴在电场作用下分别向两极运动,因电子运动速度远快于空穴,前端出现大量堆积的光生电子,后部是空穴,如图 5 所示.光激发电荷畴头部是高温、高密度电子流,电荷畴以  $10^7 \text{ cm/s}$  的速度向阳极渡越时,会发生畴曳引声子流效应.同时电荷畴在传播过程中存在温度梯度,就有热能从高温传向低温,产生热流,热流的一部分是靠晶格振动传到冷端,也就是说产生了声子流.通常情况下,由于开关芯片系统的动量守恒,电子散

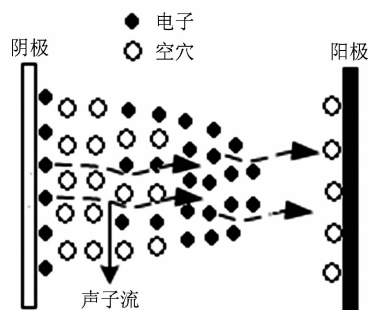


图 5 光激发电荷畴-声子曳引效应

射时发射的声子运动的方向和原来电子的方向相同,即声子的曳引有助于光激发电荷畴的传播.声子曳引电子流的增强会引起电子密度分布不均匀,引起热声子密度空间波动,声子密度的空间波动引起热声子的局部增强,加速了电子聚集,所以说声子曳引效应促进了电荷畴的形成和运动.当开关进入非线性模式,此时会有载流子雪崩倍增效应发生,声子曳引的电子数呈指数增多,曳引作用也将越强烈.

## 4. 丝状电流分析

### 4.1. 丝状电流特性

因为 GaAs 是直接带隙半导体,丝状电流内电子-空穴辐射复合发射的光子波长是  $875 \pm 10 \text{ nm}$ <sup>[27]</sup>,电流丝的传播速度大于  $5 \times 10^8 \text{ cm/s}$ <sup>[28,29]</sup>.丝状电流中平均载流子浓度范围在  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  至  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  之间<sup>[30]</sup>,局部可达到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  至  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .这些都证实了丝状电流其实就是由电子-空穴组成的高密度区等离子体通道.在丝状电流通道内由于电

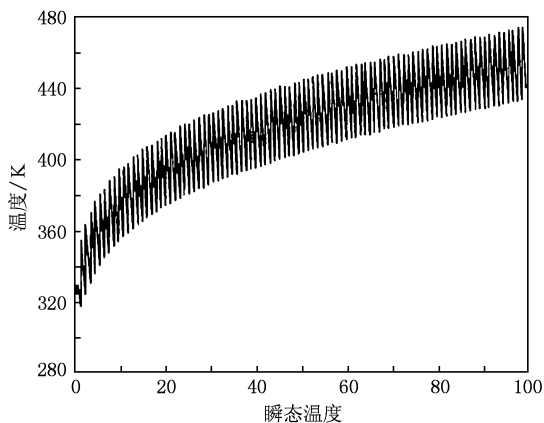


图 6 开关芯片内瞬态温度变化<sup>[26]</sup>

子和空穴浓度较高,容易发生极强的热弛豫效应和声子曳引效应,所引发的弛豫振荡使得开关芯片瞬态温度变化较小,抑制了芯片温度的急剧升高,如图 6 所示<sup>[26]</sup>. 在一定的阈值条件下,弛豫振荡过程使得丝状电流密度远小于达到预击穿状态的高能量密度, GaAs 晶格温度远小于热载流子温度,开关芯片内部产热和冷却之间达到了动态热平衡过程.

#### 4.2. 丝状电流轨迹

在半绝缘 GaAs 晶体中位错和微缺陷是相互作用的,位错吸附微缺陷,微缺陷缀饰位错,使得在位错线附近热应力更强,化学键最易发生破裂. 根据 Peierls-Nabarro 位错模型<sup>[31,32]</sup>,位错的运动实际上与晶格点阵分(原)子的运动有关,而点阵微扰会产生声子. 由于位错的运动一般都限制在滑移面内,运动位错仅在运动方向上发射声子,产生的声子就只在位错运动方向上传播,形成声子的能量集中在移动区域. 在电荷畴曳引声子流、声子流曳引电荷畴的相互作用下,电荷畴携带热能沿着芯片位错线

方向传播,导致芯片会发生非均匀膨胀,因而在芯片内形成热塑性应力. 应力将降低打破化学键所需的能量,产生空位缺陷,这样电荷畴的渡越轨迹就大体沿着晶体内位错线方向,呈现出丝状形态,移动轨迹经多次叠加累积呈现出丝状的损伤痕迹,如图 3 所示.

## 5. 结 论

本文分析了半绝缘 GaAs 光电导开关在非线性工作模式下的瞬态热效应,通过对热弛豫效应和光激发电荷畴-声子曳引效应的分析表明:当光激发电荷畴以  $10^7$  cm/s 的速度从阴极向阳极渡越时,热弛豫过程导致了热传导的弛豫行为,在这些效应作用下,使得开关芯片内部瞬态温度变化发生了弛豫振荡现象,制约了芯片温度的急剧升高;光激发电荷畴-声子曳引效应在位错运动方向上传播,形成声子的能量集中在这些移动平面内,使得移动区域温度升高;移动轨迹经多次迭加累积呈现出丝状的损伤痕迹.

- [1] Loubrie G M, Zutavem F J, Baca A G, Hjalmarson H P, Plut T A, Helgeson W D, Malley W O, Ruebush M H, Brown D J 1997 *IEEE Trans. Plasma Science* **25** 124
- [2] Islam N E, Schamiloglu E, Fledderman B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1988
- [3] Shi W, Tian L Q 2006 *Appl. Phys. Lett* **89** 202103
- [4] Jia W L, Ji W L, Shi W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2042 (in Chinese) [贾婉丽、纪卫莉、施 卫 2007 物理学报 **56** 2042]
- [5] Shi W, Wang X M, Hou L, Xu Ming, Liu Zheng 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6816 (in Chinese) [施 卫、王馨梅、侯 磊、徐 明、刘 铮 2008 物理学报 **57** 6816]
- [6] Shi W, Qu G H, Wang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 477 (in Chinese) [施 卫、屈光辉、王馨梅 2009 物理学报 **58** 477]
- [7] Liang L, Yu Y H, Peng Y B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2627
- [8] Xu X J, Chen S W, Xu H H, Sun Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3900
- [9] Shi W, Zhang X B, Li Q 2002 *China. Phys. Lett.* **19** 351
- [10] Shi W, Tian L Q 2004 *Chinese Journal of Semiconductor* **25** 691 (in Chinese) [施 卫、田立强 2004 半导体学报 **25** 691]
- [11] Shi W, Tian L Q, Liu Z, Zhang L Q, Zhang Z Z 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 043511
- [12] Li J X, Zhang M J, Niu S X and Wang Y C 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4516
- [13] Liu Y M, Yu Z Y, Ren X M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 881
- [14] Shah. J, 1978 *Solid-State Electron* **21** 43
- [15] Liu J 2001 *Micro/Nano-scale Heat Transfer* (Beijing: Science Press) p 208 (in Chinese) [刘 静 2001 微米/纳米尺度传热学(北京:科学出版社)第 208 页]
- [16] Albert M T Kim, 2001 *Ph. D. Dissertation* (Massachusetts: Harvard University)
- [17] Herring C, Geballe T H, Kunzler J E 1954 *Phys. Rev.* **94** 279
- [18] Herring C 1954 *Phys. Rev.* **92** 1163
- [19] Herring C 1954 *Phys. Rev.* **92** 857
- [20] Cheng Y S, Zhou P Y, Feng Y Q 1996 *Physical effect and applications* (Tianjin: Tianjin university press) p161 (in Chinese) [陈宜生、周佩瑶、冯艳全 1996 物理效应及其应用(天津:天津大学出版社)第 161 页]
- [21] Dugdale J S 1977 *The Electrical Properties of Metals and Alloys* (Edward Arnold publishers Ltd) p183
- [22] Shi W 2001 *Chinese Journal of Semiconductors* **22** 1481
- [23] Shi W, Dai H Y, Sun X W 2003 *Chinese Optics Letters* **1** 553
- [24] Tian L Q, Shi W 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 124512
- [25] Shi W, Qu G H, Xu M, Xue H, Ji W L, Zhang L, Tian L Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 072110
- [26] Kayasit P, Joshi R P 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1411
- [27] Shah J, Leheny R F, Wiegmann W 1977 *Phys. Rev. B* **16** 1577
- [28] Zutavern F J, Loubriel G M, McLaughling D L 1992 *Proc. SPIE* **1632** 152
- [29] Kambour K, Kang S, Myles C W, Hjalmarson H P 2000 *IEEE Tran. Plasma Science* **28** 1497

- [30] Zutavern F J, Loubriel G M, O' Malley M W, Helgeson W D, McLaughlin D L 1992 *IEEE Power Modulator Symposium, Conference Record of the Twentieth*, 23—25 Jun 1992 p305
- [31] Peierls R 1940 *Proc. Phys. Soc. London* **52** 34
- [32] Nabarro F R N 1947 *Proc. Phys. Soc. London* **59** 256

## Transient thermal effect of semi-insulating GaAs photoconductive switch\*

Shi Wei<sup>1)2)†</sup> Ma Xiang-Rong<sup>1)</sup> Xue Hong<sup>1)</sup>

1) (Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

2) (State key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 19 July 2009; revised manuscript received 7 December 2009)

### Abstract

Results of experiments of the 4 mm gap semi-insulating(SI) GaAs photoconductive switch triggered by 1064 nm, 1.0 mJ pulse laser showed the nonlinear mode when the bias field was 3800 V. Under the same bias electric field and trigger light energy conditions, the switch outputs stably nonlinear electrical pulses, and the switch surface injury mark is caused by filamentation after 1500 times triggering. Analysis shows that under given conditions of trigger energy and electric field, two transient thermal effects occur in the switch chip, namely the thermal relaxation and photoactivated charge domain-phonon drag, respectively. Thermal relaxation time is shortened to the order of picoseconds or subpicoseconds, thermal relaxation process leads to the thermal conduction relaxation. When photoactivated charge domain moves at  $10^7$  cm/s speed from cathode to anode, switch chip transient temperature makes relaxation oscillations owing to these effects, and the rapid increase of temperature in the chip is constrained. Photoactivated charge domain-phonon drag effect transmits in the direction of the dislocation movement, the temperature in mobile region increases when the flow of thermal energy carried by the phonons was concentrated in the movement plane, the injury of filamentation is produced by superposition and cumulation of mobile tracks.

**Keywords:** SI-GaAs photoconductive switch, thermal relaxation effect, photoactivated charge domain-phonon drag effect, filamentation

**PACC:** 7220H

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310406), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50837005, 10876026), State key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment (Grant No. EIPE09203).

† E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn