

GaAs 光电导开关非线性模式的雪崩畴运输机理*

田立强[†] 潘璁 施卫 潘艺柯 冉恩泽 李存霞

(西安理工大学理学院, 西安 710048)

(2023 年 5 月 4 日收到; 2023 年 5 月 30 日收到修改稿)

光电导开关非线性模式的产生机理研究是该领域热点问题之一. 本文采用波长 1064 nm、脉宽 5 ns 的激光脉冲触发半绝缘 GaAs 光电导开关, 在触发光能 1 mJ、偏置电压 2750 V 时获得稳定的非线性波形. 基于双光子吸收模型, 计算了开关体内光生载流子浓度, 计算结果表明光生载流子弥补了材料本征载流子的不足, 在开关体内形成由光生载流子参与的电荷畴. 依据转移电子效应原理, 对畴内的峰值电场进行了计算, 结果表明高浓度载流子可使畴内峰值电场远高于材料的本征击穿场强, 致使畴内发生强烈的雪崩电离. 基于光激发雪崩畴模型, 对非线性模式的典型实验规律进行了解释, 理论与实验一致. 基于漂移扩散模型和负微分电导率效应, 对触发瞬态开关体内电场进行仿真, 结果表明开关体内存在有峰值电场达 GaAs 本征击穿场强的多畴运输现象. 该研究为非线性光电导开关的产生机理及光激发电荷畴理论的完善提供实验依据和理论支撑.

关键词: GaAs 光电导开关, 非线性模式, 双光子吸收, 光激发雪崩畴**PACS:** 81.05.Ea, 72.40.+w, 85.30.Fg, 72.20.Ht**DOI:** 10.7498/aps.72.20230711

1 引言

高功率超快开关是脉冲功率系统的核心部件, 其不仅决定了脉冲功率装置的输出特性, 在某种程度上甚至是脉冲功率系统成败的关键. 传统的脉冲功率开关是气体开关, 例如闸流管 (thyratrons) 和火花隙开关 (spark gap), 它们已在高功率脉冲激光、功率调节系统、冲击雷达、高功率微波源等有重要应用. 然而由于这些开关的体积大、触发动抖、开启时间长、有限功率容量等固有缺点, 而限制了它们的应用^[1-3].

光电导开关 (photoconductor semiconductor switches, PCSSs) 是利用超短脉冲激光器与光电导材料相结合形成的一类新型半导体光电子器件. 与传统开关相比, PCSSs 具有开关速度快 (亚纳秒量级)、触发动抖低 (皮秒量级)、寄生电感电容小、

结构简单紧凑等特点, 特别是耐高压及其大功率容量, 使其在超高速电子学、大功率脉冲产生与整形 (大功率亚纳秒脉冲源、超宽带射频发生器) 及 THz 辐射等领域具有广泛的应用^[4-16].

研制高功率 PCSSs 可选用的材料有 SiC、金刚石、InP、Si、GaAs 等, 由于 Si 和 GaAs 材料的制备工艺相对成熟, 成为研制 PCSSs 的主要材料. 与 Si 材料相比较, GaAs 具有电子迁移率高、击穿强度大、载流子寿命短等特点, 特别是 GaAs PCSSs 在强电场作用下具有的载流子雪崩倍增效应使开关导通所需的触发光能显著减少的特点, 使得 GaAs 材料成为研制高功率高重复频率超快 PCSSs 的首选材料^[17-19]. GaAs PCSSs 具有两种不同的工作模式: 线性工作模式和非线性工作模式. 当开关偏置电场低于某一阈值时, 开关工作于线性模式, 此时开关输出电脉冲波形完全由触发光脉冲决定, 开关每吸收一个光子, 最多产生一个电子-空穴对, 光

* 国家自然科学基金 (批准号: 61427814, 61076087, 41975040) 和中国博士后科学基金 (批准号: 20100481349) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: tianliqiang@xaut.edu.cn

电导开关线性模式的导通机理很容易用光子将价带电子激发到导带的导电过程加以解释. 当光电导开关的偏置电场高于某一阈值时, 开关将工作于非线性模式 (即高倍增模式, 或 lock-on 效应), 其典型特征是开关每吸收一个光子可产生多个电子-空穴 (开关体内发生了载流子的雪崩碰撞电离). 非线性光电导开关具有引发、维持和恢复阶段, 其特点有: 1) 非线性模式存在触发光能和偏置电场阈值; 2) 触发光脉冲和输出电脉冲之间存在时间延迟; 3) 开关导通时, 开关电流在开关体内汇聚成丝, 丝状电流在开关体内的传播速度比载流子的饱和漂移速度大 1—2 个数量级; 4) 开关电场锁定在一个与初始偏置电场、开关的几何尺寸无关的稳定值; 5) 开关导通所需光能比线性模式下小 3—5 个数量级. 由于非线性光电导开关具有弱光触发的大功率超快特性, 从而引起脉冲功率界研究人员极大地兴趣. 然而, 非线性光电导开关导通过程中, 电流高度集中成丝, 且导通时间长达 μs 量级, 这极大地限制了开关的使用寿命和重复频率. 由于强电场下 GaAs 材料特殊能带结构导致的载流子复杂动力学行为, 直到目前, 对 GaAs PCSSs 的非线性工作模式还未形成统一的理论^[20–22].

本文采用波长 1064 nm、脉宽 5 ns 的激光脉冲触发 GaAs PCSSs, 在获得稳定非线性波形的基础上, 依据光激发电荷畴理论^[17]和双光子吸收模型, 对非线性光电导开关触发瞬态过程中的雪崩倍增机理、电场锁定效应、载流子超快输运特性、及光激发载流子浓度进行理论分析和计算, 并基于漂移扩散模型和负微分电导机制对光激发电荷畴的输运特性进行仿真. 本研究为 GaAs 功率器件在强电场环境下的载流子输运机制研究提供理论依据.

2 实验

实验采用横向 PCSSs, 其结构示意图如图 1 所示, 开关芯片为半绝缘 (semi-insulating, SI) 液封直拉 (liquid encapsulated Czochralski, LEC) 原生 GaAs, 掺杂浓度为 $1.5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 材料暗态电阻率 $\rho \geq 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 电子迁移率 $\mu > 5500 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 开关芯片厚度为 0.6 mm、宽为 0.8 mm、长为 1.0 cm. 开关电极为 Au/Ge/Ni 合金电极, 通过电子束蒸发工艺, 经退火处理与开关芯片形成欧姆接触. 电极尺寸为 $8 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 电极间隙为 3 mm. 开关的

绝缘保护采用多层固态透明介质 (见图 1), 第 1 层介质是 Si_3N_4 钝化保护层, 第 2 层介质是新型有机硅凝胶. 开关芯片放置在由高导热率性能的 Al_2O_3 陶瓷敷铜板制作的微带传输线衬底上, 通过同轴接头形成开关的输入/输出端.

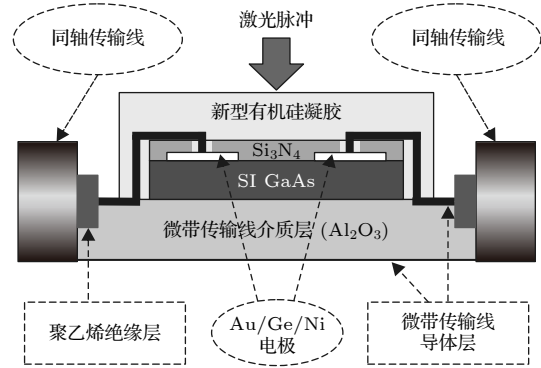


图 1 光电导开关的结构示意图
Fig. 1. Diagram of the structure of the lateral switch.

开关的测试电路如图 2 所示. 开关的偏置电压由 $0.01 \mu\text{F}$ 的储能电容提供, 电容器经 $10 \text{ M}\Omega$ 电阻与高压直流电源连接, 开关输出端经带宽 4 GHz, 60 dB 的同轴衰减器与带宽 6 GHz 的示波器 (LeCroy-8600 A) 连接, 触发光源为波长 1064 nm、脉冲宽度为 5 ns 的掺钕: 钇铝石榴石 (Nd: YAG) 纳秒脉冲激光器. 用 KSDP2210-CAS-1 光能量计对触发光能进行测量.

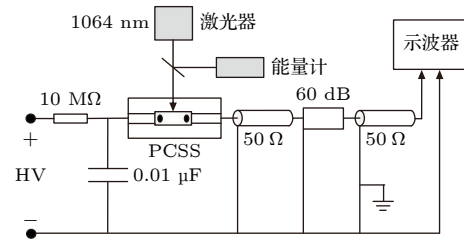


图 2 光电导开关的测试电路
Fig. 2. Test circuit of the switch.

开关触发光采用点触发方式, 聚焦光斑直径大小约 0.3 mm, 触发光的脉冲能量为 1 mJ. 开关的起始偏置电压为 100 V, 随后, 偏置电压每升高 50 V 触发一次开关. 起初开关工作于线性模式, 图 3 为偏置电压为 500 V 时开关输出的线性电脉冲波形 (重复触发开关 50 次的线性电脉冲的重叠图), 可以看出线性模式下开关输出电脉冲十分稳定, 脉冲宽度约 10 ns, 脉冲下降沿约 20 ns (由光激发载流子寿命决定). 当开关电压升高至 2750 V

(对应偏置电场为 9.17 kV/cm) 时, 开关进入非线性模式, 图 4 为重复触发开关 50 次时开关输出非线性电脉冲波形的重叠图, 这时开关输出的电流波形突然加宽, 脉冲持续时间长达 μs 量级. 由图 4 可以看出, 除由于偏置电压的涨落 (约为 5%) 引起输出波形有微小变化 ΔU (约 120 V) 外, 开关输出基本稳定. 当偏置电压继续升高时, 开关输出电脉冲也随之增高, 但开关上的分压始终保持不变, 锁定在一个确定的量值, 即开关发生了电场锁定效应. 从图 4 可以看出, 开关的 lock-on 电压约 2060 V (开关的偏置电压减输出电压), 对应 lock-on 电场为 6.87 kV/cm.

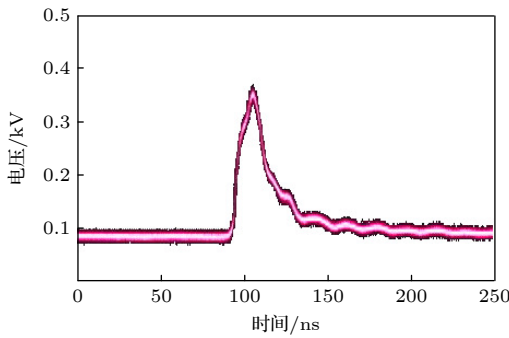


图 3 偏置电压为 500 V、触发光能为 1 mJ 时, 开关输出的 50 次重叠线性波形
Fig. 3. Superposed linear waveform of fifty times output from the switch under the bias of 500 V and trigger optical pulse energy of 1 mJ.

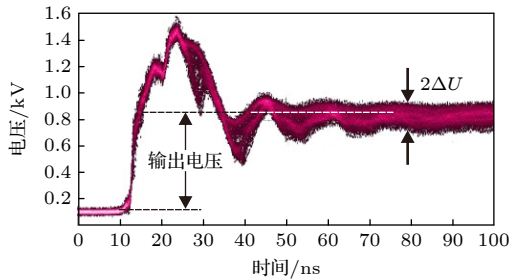


图 4 偏置电压为 2750 V、触发光能为 1 mJ 时, 开关输出的 50 次重叠非线性波形, ΔU 为偏置电压涨落引起的开关输出电压变化
Fig. 4. Superposed nonlinear waveform of fifty times output from the switch under the bias of 2750 V and trigger optical pulse energy of 1 mJ, ΔU is the uncertainty limit of output voltage caused by bias voltage fluctuation.

3 光激发电荷畴模型

对于 GaAs 等 III-V 族化合物半导体器件, 当器件的偏置电场高于某一阈值电场 (耿氏阈值电

场, 对 GaAs 材料约为 3.2—4.2 kV/cm) 时, 器件体内将发生电子由主能谷向子能谷散射的转移电子效应^[23]. 由于子能谷电子迁移率远小于主能谷的电子迁移率, 从而发生负微分迁移率效应. 这时随着偏置电场的增强, 电子的漂移速度反而下降. 通常, 当器件工作时, 电子在阴极的注入会导致阴极附近电场畸变而形成高电场区, 因此转移电子效应首先发生在器件阴极附近区域. 在该区内, 由于负微分迁移率效应, 电子的速度随电场的增大而减小, 但高场区前后电场较低, 因而高场区外电子的漂移速度大于区内电子的漂移速度, 于是在高场区后面看, 就会形成电子的积累. 电子的积累会导致该区域的电场进一步增强, 这样由于负微分迁移率效应, 电子会进一步的堆积, 于是出现高浓度的电荷区域, 这便形成了空间电荷畴.

由于稳态畴的形成需要一定的时间 (畴生长时间), 这就要求畴的渡越时间 (电荷畴从阴极运动到阳极的时间) 必须长于畴的生长时间, 克罗默 (Kroemer) 首先从理论上指出, 要形成稳态畴必须满足器件载流子浓度与器件长度的乘积大于某一阈值, 其给出的阈值条件为^[24]

$$n \times L > 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \quad (1)$$

式中 L 为器件长度, n 为器件材料的掺杂浓度. 对于半绝缘 (SI) GaAs, 由于材料的掺杂浓度很低, 一般不能满足克罗默判据, 因此认为 SI-GaAs 器件中不能产生电荷畴^[25].

在非线性光电导开关的大量实验中发现^[17,19,22]: 1) 开关的非线性模式仅存在于由 III-V 族化合物半导体研制的开关中; 2) 且开关的偏置电场及 lock-on 电场均大于耿氏阈值电场. 由于开关在触发瞬间, 开关体内将产生大量的电子-空穴对, 且光激发载流子寿命 (ns 量级)^[22] 远大于畴的生长时间 (ps 量级)^[23], 因此, 虽然本实验中开关间隙与载流子浓度的乘积仅为 $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ (远小于阈值条件), 但光注入载流子可弥补材料本征载流子的不足, 参与畴的整个生长过程. 在开关非线性模式实验中, 触发光能为 1 mJ, 脉冲宽度为 5 ns, 触发光斑直径为 0.3 mm, 则触发光强度可计算为

$$I_0 = \frac{E_a}{ST_L} = 0.28 \text{ GW/cm}^2, \quad (2)$$

式中 E_a 为入射光能量, T_L 为激光脉冲宽度, S 为入射光斑面积. 在如此高的光照条件下, 可认为双

光子吸收占主导地位^[26], 双光子吸收过程可表示为

$$\frac{dI}{dz} = -\beta I^2, \quad (3)$$

式中 β 为双光子吸收系数, 对 1064 nm 光波, GaAs 的双光子吸收系数 $\beta = 23 \text{ cm/GW}^{[27]}$, 求解 (3) 式可得透射光强为

$$I = \frac{I_0}{1 + I_0 \beta d}, \quad (4)$$

式中 d 为开关芯片厚度, 考虑到在双光子吸收过程中, 开关材料每吸收两个光子只可产生一个电子-空穴对, 因此光激发载流子浓度可表示为

$$n' = \frac{\beta(1-R)^2 I_0^2 \tau}{2h\nu [\beta(1-R) I_0 d + 1]}, \quad (5)$$

式中 R 为空气和 GaAs 界面的反射系数 ($R \approx 0.3$)^[28], τ 为 SI-GaAs 材料的载流子寿命 ($\tau \approx 1 \text{ ns}$)^[29], $h\nu$ 为单个光子的能量. 由 (5) 式计算可得光激发载流子浓度为 $2.66 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 这时载流子浓度沿器件长度的积分 $\int_0^L n(l) \cdot dl \approx 7.98 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, 该值远大于形成电荷畴所需的阈值条件, 即在该实验的触发电压阈值条件下, 开关体内可发生由光激发载流子形成的电荷畴 (光激发电荷畴). 因此, 形成电荷畴所需载流子浓度与器件长度乘积的阈值条件应改写为: 光注入载流子浓度与材料本征载流子浓度之和沿器件长度的积分满足克罗默阈值关系, 该关系可表示为

$$\int_0^L (n + n') \cdot dl > 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \quad (6)$$

式中 n 为材料的本征载流子浓度, n' 为光注入载流子浓度.

4 非线性模式的机理分析

由以上分析计算可知, 在 SI-GaAs PCSSs 非线性工作模式下, 能够满足形成电荷畴的基本条件, 那么在开关导通过程中必然形成光激发电荷畴. 对于稳态电荷畴, 在快速输运过程中, 若忽略载流子扩散的条件下, 电荷畴内电场分布呈三角形^[30], 如图 5 所示. 畴沿传播方向的空间宽度 W_d 和畴外电场 E_0 可分别表示为^[31]

$$W_d = \frac{\varepsilon}{e(n + n')} (E_p - E_0), \quad (7)$$

$$E_0 = v_s / \mu, \quad (8)$$

式中, $\varepsilon = 1.17 \times 10^{-10} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 为 GaAs 的介电常数, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电子电量, E_p 为电荷畴内的峰值电场, $v_s = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 和 μ 分别表示电子的饱和漂移速度和电子的低场迁移率. 令 $\mu = 8000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$, $W_d = 0.1 \text{ } \mu\text{m}^{[32]}$, 则由 (7) 式和 (8) 式可得光激发电荷畴内的峰值电场 $E_p = 3.6 \times 10^3 \text{ kV/cm}$, 该计算值远大于 GaAs 材料的本征击穿场强 $250 \text{ kV/cm}^{[33]}$. 由于电荷畴内电场可达到远大于材料本征击穿的程度, 因此, 将在材料内部引起强烈的雪崩电离. 该雪崩畴的形成正是引发非线性 PCSSs 载流子雪崩倍增的内在物理机制, 非线性模式的触发电压阈值条件, 实际为形成雪崩畴对器件载流子浓度和偏置电场的要求.

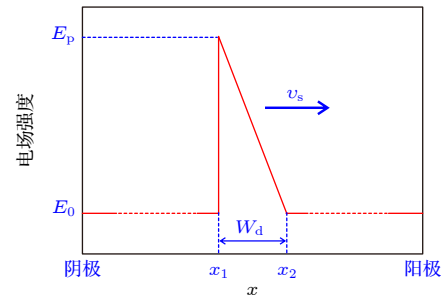


图 5 电场呈三角形分布的空间电荷畴的示意图, E_p 为畴内峰值电场, E_0 为畴外电场, W_d 为畴宽, v_s 为载流子饱和漂移速度, x_1 和 x_2 分别为电荷畴后端和前端位置坐标

Fig. 5. Schematic of the space charge domains with a triangular shape electric field distribution, E_p is the peak electric field within the domain, E_0 denotes the external electric field of the domain, and v_s indicates the saturation drift velocity of the carriers, x_1 and x_2 represent the posterior and anterior position coordinates of the charge domain, respectively.

开关体内发生碰撞电离后, 随即会出现载流子的复合过程, 强烈的雪崩电离形成的带间复合可产生大量的复合辐射光子, 复合辐射光子可被材料再次吸收, 而形成替代外部触发的可移动的触发光源. 复合辐射光子触发形成的载流子同样可参与电荷畴的形成, 于是在初始雪崩畴传播的方向上, 可形成新的光激发电荷畴. 由于初始电荷畴强烈的雪崩电离可形成高强度的复合发光, 因此复合辐射的再吸收可激发高的载流子浓度, 足以使新生畴的内部电场达到雪崩的程度, 于是新生畴重复初始畴的雪崩电离和复合发光过程. 这种过程可以重复进行, 这样就形成了非线性模式的多畴输运方式.

带间复合辐射光子的波长为 876 nm, 该波长光波在 GaAs 材料中的吸收深度^[34]为 2 μm, 这对应于光子在相邻两个电荷畴之间传播的距离, 而畴的生长时间为电荷畴以电子的饱和漂移速度在材料中的传播时间, 因此, 传播在最前面的光激发电荷畴(种子畴)等效于以电子的饱和漂移速度和光的传播速度交替传输, 其表观漂移速度可表示为

$$v = \frac{a \frac{v_c}{v_d} + v_c \tau_R}{a + v_c \tau_R} v_d = \gamma \cdot v_d, \quad (9)$$

式中 a 为 GaAs 材料的吸收深度, $v_c = c/\sqrt{\varepsilon_r}$ 为光在 GaAs 材料中的传播速度 ($c = 3.0 \times 10^{10}$ cm/s 为真空中的光速), $\varepsilon_r = 13.18$ 为 GaAs 材料的相对介电常数), $v_d = v_s$ 为畴的传播速度, 由于光的传播速度恒大于电荷畴传输速度, 因此 γ 为大于 1 的系数, $\tau_R = 1$ ps 为雪崩畴的生长时间, 则由 (9) 式可得载流子的漂移速度为 $v = 2.1 \times 10^8$ cm/s, 与实验观测结果基本一致^[35].

由 (9) 式可以看出, 在载流子饱和漂移速度不变的情况下, 载流子的表观漂移速度主要由复合辐射的吸收深度、光在 GaAs 中的传播速度、及雪崩畴的生长时间决定. 复合辐射的吸收深度主要由材料的能带结构和辐射光的波长决定, 光在介质中的传播速度主要决定于介质的介电常数, 因此两者均可认为是不变的常数. 这样, 载流子表观漂移速度主要决定于雪崩畴的生长时间. 当偏置电压增高时, 电荷畴达到雪崩所需时间将缩短, 由 (9) 式可得表观漂移速率将增大, 开关的导通速度加快, 输出电脉冲上升时间变短, 这与实验结果一致^[36].

在非线性 PCSSs 触发瞬间, 由于高浓度光激发载流子可使光激发电荷畴内电场达到远高于 GaAs 材料本征击穿场强的程度, 但由于畴内的雪崩电离和复合发光, 使得畴内电场迅速下降, 于是, 除传播于最前方的种子电荷畴外, 其余电荷畴的内部峰值电场最终降落到(或略高于)材料的本征击穿场强的大小, 以维持雪崩畴的运输, 雪崩畴模型的示意图如图 6 所示. 若令畴内峰值电场为 280 kV/cm, 则三角形畴内的平均电场 \bar{E}_d 为 140 kV/cm, 这时开关体内的平均电场, 即 lock-on 电场可表示为

$$E_{\text{lock}} = \frac{1}{L} \int_0^L E(l) dl = \frac{N_d W_d \bar{E}_d + E_0 (L - N_d W_d)}{L}, \quad (10)$$

式中, N_d 为开关导通后开关体内电荷畴数量, 依据复合辐射光子触发畴形成过程(光激发电荷畴传输机制), 开关芯片内的电荷畴数量可表示为

$$N_d = \frac{L}{\tau_R v_s + a}. \quad (11)$$

代入相关参量可得 lock-on 电场约为 6.94 kV/cm, 与实验结果很好地符合.

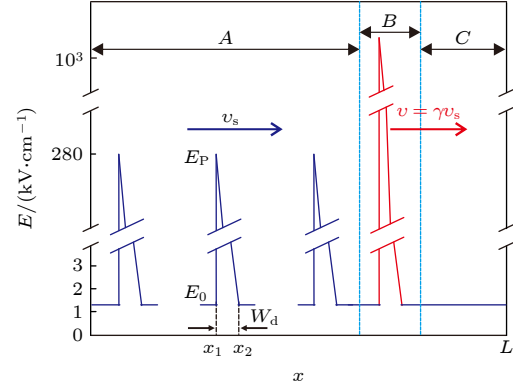


图 6 雪崩畴模型, 区域 A 为稳态雪崩畴区, 区域 B 为种子畴, 区域 C 为未电离区

Fig. 6. Avalanche charge domain model, region A is steady state avalanche charge domain, region B is seed charge domain, region C is unionized area.

由 (10) 式和 (11) 式可以看出, lock-on 电场决定于开关芯片材料特性相关的参数(载流子饱和和漂移速度, 畴外电场, 材料本征吸收限的吸收深度)和稳态雪崩畴的特性(畴峰值电场, 畴生长时间, 畴宽度). 当电荷畴生长时间不变时, 由 (11) 式可知开关体内的电荷畴数量与器件长度成正比, 即当器件长度增大时, 电荷畴也随之增加, 二者的比值保持不变, 则由 (10) 式可知, lock-on 电场与器件长度无关. 当偏置电场增大时, 雪崩畴的生长时间缩短, 畴的数量将增加, 但由于畴数量、畴宽、峰值电场相互制约^[37](制约机制还需要进一步研究), 仍可保持 lock-on 电场恒定不变.

由以上分析可知, PCSSs 非线性模式中存在光激发载流子参与形成的电荷畴(光激发电荷畴), 光激发电荷畴引起的局部电场增强(场强高于材料的本征击穿场强)是非线性模式载流子雪崩倍增的内在物理机制, 开关体内载流子的超快运输和 lock-on 电场是光激发电荷畴传输机理和多畴运输模式的必然结果. 由于开关所处电路不断放电, 使开关两端电压不断下降, 当开关电场低于电荷畴的维持电场(电荷畴生存所需最小电场)时, 光激发

电荷畴在输运过程中猝灭^[22], 这样开关就失去载流子倍增的内在动力, 于是, 由于载流子的不断复合, 开关将处于关断状态.

5 雪崩畴特性

光激发电荷畴模型的关键在于指出 PCSSs 非线性模式中存在着有光激发载流子参与形成的雪崩畴. 虽然光激发电荷畴模型对非线性模式的理论解释为光激发电荷畴的存在具有支撑作用, 但要承认半绝缘 GaAs 中可存在光诱导的雪崩畴, 还需要进一步的证据. 为此, 利用 Silvaco-Atlas 器件模拟器对光触发下半绝缘 GaAs 器件内的瞬变电场分布进行了 2D 仿真. 仿真选用半绝缘 GaAs 的掺杂浓度为 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 开关电极间隙为 $30 \mu\text{m}$, 芯片厚度为 $60 \mu\text{m}$, 触发功率为 10^6 W . 在无光照时, 器件长度与载流子浓度乘积仅为 $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$, 不能满足电荷畴形成条件, 因此无论施加多大的偏置电压, 器件内也不能形成电荷畴. 为了在器件体内形成电荷畴, 使用波长 900 nm 的触发光, 在偏置电压为 200 V 时, 对器件瞬变载流子浓度和瞬变电场分布进行仿真研究. 图 7 为开关触发后 360 ps 时器件内瞬变载流子浓度分布, 可以看出电极之间 (触发光覆盖区域) 载流子浓度分布在 $2 \times 10^{16} \sim 2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 范围 (与实验条件下理论计算得到的载流子浓度基本一致), 能够满足载流子浓度与器件长度乘积的耿氏阈值条件 ($n \cdot L > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$). 图 8 为器件分别在触发后 $300, 360$ 和 420 ps 的瞬变电场分布. 从图 8 可以看出, 器件内存在有多畴

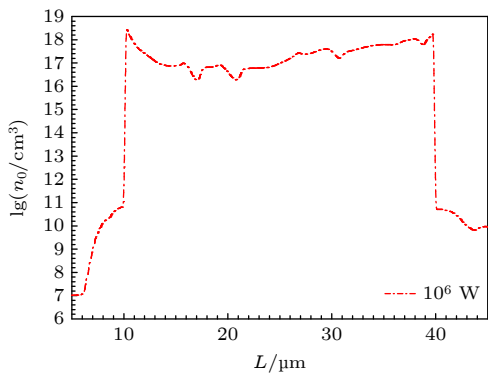


图 7 触发光功率为 10^6 W , 光触发后 360 ps 时开关体内载流子浓度分布

Fig. 7. Snapshots of the carriers concentration profile in the bulk of switch at 360 ps after the optical trigger and under a trigger optical power of 10^6 W .

输运现象, 电荷畴的传输速度约为 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$, 每个大的主电荷畴前后存在若干小的子电荷畴, 主畴宽度 d_2 约为 $5 \mu\text{m}$, 子畴宽度 d_1 约为 $1 \mu\text{m}$. 触发后时间 $300, 360$ 和 420 ps 时的畴内最大峰值电场分别为 $256.7, 304.4$ 和 326.4 kV/cm , 在阴极附近电荷畴的电场高达 650.5 kV/cm . 这种峰值电场接近、甚至超过 GaAs 材料本征击穿场强的快速移动多雪崩电荷畴应该是形成非线性光电导载流子雪崩电离的主要机制.

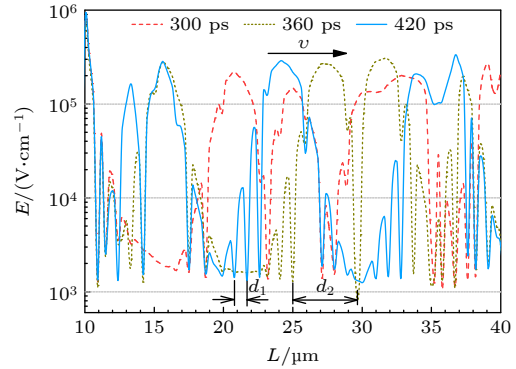


图 8 器件触发后 $300, 360$ 和 420 ps 时开关体内瞬变电场分布, d_1 和 d_2 分别子畴和主畴的宽度, v 为电荷畴的漂移速度

Fig. 8. Snapshots of the electric field profiles in the bulk of the switch at $300, 360$ and 420 ps , respectively after the switch triggered by the light. Here, d_1 and d_2 denote the width of subsidiary charge domain and main charge domain, respectively, and v is drift velocity of the charge domain.

6 结 论

本文进行了 SI-GaAs PCSSs 非线性工作模式实验, 在偏置电压 2750 V , 触发光能量 1 mJ 时, 开关进入非线性模式, 获得稳定的非线性波形. 结合开关非线性模式实验, 对 SI-GaAs PCSSs 的光吸收机制和非线性模式的工作机理进行理论分析和计算, 并对光触发下 SI-GaAs 器件内瞬变载流子浓度和电场分布进行了仿真. 1) 理论分析和计算结果表明, 高功率 ns 激光脉冲触发下, 双光子吸收机制可使开关体内产生高浓度的光激发载流子, 使 SI-GaAs PCSSs 满足形成电荷畴所需的阈值条件; 高浓度的载流子可使光激发电荷畴内部场强达到远高于材料本征击穿强度的程度, 引起开关雪崩电离击穿; 载流子的超快输运是由于电荷畴内雪崩电离引发的复合发光再吸收过程使种子畴 (传播在

最前面的光激发电荷畴)以光速和载流子的饱和漂移速度交替输运造成的; lock-on 电场是由光激发雪崩畴输运机制及电荷畴的固有属性决定. 2) 仿真结果表明, 光激发载流子可以在 SI-GaAs 中诱发电荷畴的产生, 电荷畴的峰值电场可以达到甚至超过 SI-GaAs 的本征击穿场强, 形成引发器件体内强烈碰撞电离的雪崩畴. 理论分析、计算和仿真结果能够与实验相互印证. 该研究对 PCSSs 非线性模式产生机理的深入研究、强电场偏置下 GaAs 功率器件载流子输运机理研究、及非线性 PCSSs 在脉冲功率系统中的应用研究具有重要意义.

参考文献

- [1] Sun G X, Wang X, Ding W D, Yan J Q, Shen S K, and Nie S H 2023 *IEEE Trans. Electron Dev.* **70** 765
- [2] Shi W, Tian L Q, Liu Z, Zhang L Q, Zhang Z Z, Zhou L J, Liu H W, Xie W P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 043511
- [3] Han K H, Zhao W J, Zeng X, Chu E Y, Jiao Q J 2023 *IEEE T. Power Electron.* **38** 3375
- [4] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, Hjalmarson H P, Plut T A, Helgeson W D, O'Malley M W, Ruebush M H, and Brown D J 1997 *IEEE T. Plasma Sci.* **25** 124
- [5] Zhang D H, Xu Z, Cheng G, Liu Z, Gutierrez A R, Zang W, Norris T B, Zhong Z H 2022 *Nat. Commun.* **13** 6404
- [6] Lu P K, Jiang X H, Zhao Y F, Turan D, Jarrahi M 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 261107
- [7] Woo K, Malakoutian M, Reeves B A, Chowdhury S 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 112104
- [8] Gui H M, Shi W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 194206 (in Chinese) [桂淮濛, 施卫 2019 物理学报 **68** 194206]
- [9] Tian L Q, Shi W, Feng Q Q 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 094507
- [10] Shi W, Tian L Q, Wang X M, Xu M, Ma D M, Zhou L J, Liu H W, Xie W P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1219 (in Chinese) [施卫, 田立强, 王馨梅, 徐鸣, 马德明, 周良骥, 刘宏伟, 谢卫平 2009 物理学报 **58** 1219]
- [11] Zutavern F J, Glover S F, Reed K W, Cich M J, Mar A, Swalby M E, Saiz T A, Horry M L, Gruner F R, White F E 2008 *IEEE T. Plasma Sci.* **36** 2533
- [12] Kelkar K S, Islam N E, Fessler C M, Nunnally W C 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 124905
- [13] Liu R J, Shang A N, Chen C J, Lee Y G, Yin S Z 2021 *Opt. Lett.* **46** 825
- [14] Wang Z Q and Shi W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 188704 (in Chinese) [王志权, 施卫 2022 物理学报 **71** 188704]
- [15] Shi W, Ma X R, Xue H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5700 (in Chinese) [施卫, 马湘蓉, 薛红 2010 物理学报 **59** 5700]
- [16] Kelkar K, Islam N E, Kirawanich P, Fessler C M, Nunnally W C, Kemp W T, Sharma A K 2007 *IEEE T. Plasma Sci.* **35** 93
- [17] Chao J H, Zhu W B, Chen C J, Lee Y G, Shang A N, Yin S Z, Hoffman R C 2018 *Opt. Lett.* **43** 3929
- [18] Hu L, Su J C, Qiu R C, Fang X 2018 *IEEE T. Electron Dev.* **65** 1308
- [19] Chowdhury A R, Dickens J C, Neuber A A, Ness R, Joshi R P 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 085703
- [20] Shi W, Xue H, Ma X R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8554 (in Chinese) [施卫, 薛红, 马湘蓉 2009 物理学报 **58** 8554]
- [21] Sun Y, Hu L, Li Y D, Zhu L, Dang X, Hao Q S, Li X 2022 *J. Phys. D Appl. Phys.* **55** 215103
- [22] Shi W, Tian L Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 202103
- [23] Bosch B G, Engelmann R W H 1975 *Gunn-Effect Electronics* (Pitman: Bath) p23
- [24] Kroemer H 1965 *Proc. IEEE* **53** 1246
- [25] Sze S M 1981 *Physics of Semiconductor Devices* (2nd Ed.) (New York: Wiley & Sons) p652
- [26] Liu X H, Shi B, Jia G, Chen Z G, Ren C, Zhang Y H, Cao K, Zhao J X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 101109
- [27] Garcia H, Kalyanaraman R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 111114
- [28] Montoya J, Hu Q 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2230
- [29] Islam N E, Schamiloglu E, Fleddermann C B, Schoenberg J S H, Joshi R P 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 1754
- [30] Gunn J B 1967 *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-14** 720
- [31] Copeland J A 1966 *J. Appl. Phys.* **37** 3602
- [32] Vainshtein S, Yuferev V, Palankovski V, Ong D S, Kostamovaara J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 062114
- [33] Zhao H M, Hadizad P, Hur J H, Gundersen M A 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 1807
- [34] Vainshtein S, Kostamovaara J, Sveshnikov Y, Gurevich S, Kulagina M, Yuferev V, Shestak L, Sverdlov M 2004 *Electron. Lett.* **40** 85
- [35] Zutavern F, Loubriel G, McLaughlin D, Helgeson W, O'Malley M 1992 *Proc. SPIE* **1632** 152
- [36] Zutavern F J, Loubriel G M, O'Malley M W, Helgeson W D, McLaughlin D L 1991 *Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Pulsed Power San Diego, CA, USA, June 16-19, 1991* p23
- [37] Tian L Q, Wang H Q, Jing D, Pan C, Shi W, Zhang C 2021 *IEEE Trans. Electron Devices* **68** 2189

Mechanism of avalanche charge domain transport for nonlinear mode of GaAs photoconductive semiconductor switches*

Tian Li-Qiang[†] Pan Cong Shi Wei Pan Yi-Ke Ran En-Ze Li Cun-Xia

(School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 4 May 2023; revised manuscript received 30 May 2023)

Abstract

Photoconductive semiconductor switch is of significance in the fields of ultrafast electronics, high-repetition rate and high-power pulse power system, and THz radiation. The mechanism of the nonlinear mode of the switch is an important area of study. In this work, stable nonlinear wave forms are obtained by a semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by a 5-ns laser pulse with pulsed energy of 1 mJ at a wavelength of 1064 nm under a bias of 2750 V. Based on two-photon absorption model, the photogenerated carrier concentration is calculated. The theory analysis and calculation result show that the photogenerated carrier can compensate for the lack of intrinsic carrier, and lead to the nucleation of photo-activated charge domain. According to transferred-electron effect principium, the electric field inside and outside the domain are calculated, indicating that the electric field within the domain can reach the electric field which is much larger than intrinsic breakdown electric field of GaAs material, and results in strong impact avalanche ionization in the bulk of the GaAs switch. According to the avalanche space charge domain, the typical experimental phenomena of nonlinear mode for GaAs switch are analyzed and calculated, the analysis and calculations are in excellent agreement with the experimental results. Based on drift-diffusion model and negative differential conductivity effect, the transient electric field in the bulk of the switch is simulated numerically under the optical triggering condition. The simulation results show that there are moving multiple charge domains with a peak electric field as high as the intrinsic breakdown electric field of GaAs within the switch. This work provides the experimental evidence and theoretical support for studying the generation mechanism of the nonlinear photoconductive semiconductor switch and the improvement of the photo-activated charge domain theory.

Keywords: GaAs photoconductive semiconductor switches, nonlinear mode, two-photon absorption, photoactivated avalanche charge domain

PACS: 81.05.Ea, 72.40.+w, 85.30.Fg, 72.20.Ht

DOI: 10.7498/aps.72.20230711

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61427814, 61076087, 41975040) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20100481349).

[†] Corresponding author. E-mail: tianliqiang@xaut.edu.cn



GaAs光电导开关非线性模式的雪崩畴输运机理

田立强 潘聰 施卫 潘艺柯 冉恩泽 李存霞

Mechanism of avalanche charge domain transport for nonlinear mode of GaAs photoconductive semiconductor switches

Tian Li-Qiang Pan Cong Shi Wei Pan Yi-Ke Ran En-Ze Li Cun-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 178101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230711

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230711>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线性模式下GaAs光电导开关的时间抖动特性

Time jitter characteristics of GaAs photoconductive semiconductor switch in linear mode

物理学报. 2018, 67(18): 184207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180548>

Ge掺杂GaN晶体双光子诱导超快载流子动力学的飞秒瞬态吸收光谱研究

Study on two-photon induced ultrafast carrier dynamics in Ge-doped GaN by transient absorption spectroscopy

物理学报. 2020, 69(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200397>

给体位置和数目对四苯基乙烯衍生物双光子吸收性质的影响

Effects of donor position and number on two-photon absorption properties of tetraphenylethylene derivatives

物理学报. 2019, 68(18): 183101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190471>

储能电容对GaAs光电导开关快前沿正负对称脉冲输出特性的影响

Effect of capacitance on positive and negative symmetric pulse with fast rising edge based on GaAs photoconductive semiconductor switch

物理学报. 2019, 68(19): 194206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190321>

太赫兹GaAs光电导天线阵列辐射特性

Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays

物理学报. 2021, 70(24): 248704 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211210>

光电流驱动下非线性神经元电路的放电模式控制

Control of firing mode in nonlinear neuron circuit driven by photocurrent

物理学报. 2021, 70(21): 210502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210676>