



·脉冲功率技术·

触发区域宽度对砷化镓光导开关输出特性影响*

陈 红, 韦金红, 曾凡正, 贾成林, 付泽斌, 李 嵩, 钱宝良

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘 要: 基于 TCAD 数值仿真软件, 建立了异面结构砷化镓光导开关 (GaAs PCSS) 的二维数值计算模型, 研究了触发区域宽度对 GaAs PCSS 输出特性影响。首先分析了 PCSS 的瞬态导通特性, 结果表明, 急剧增加的载流子浓度与快速演化的空间电离畴使 PCSS 工作在超快速导通模式。基于此, 研究了触发区域宽度对 PCSS 输出特性影响, 结果表明, 宽度变大会促进载流子密度急剧倍增和雪崩电离畴的快速演化, 缩短 PCSS 的延迟时间和导通时间。研究分析了不同触发位置对延迟时间与导通时间影响, 结果表明, 阴极触发的延迟时间明显低于阳极触发, 而导通时间受触发位置的影响不显著。

关键词: 砷化镓; 光电导半导体开关; 异面电极; 雪崩电离畴; 超快速导通

中图分类号: TN36 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230123

Influence of the width of triggering region on output characteristics of GaAs photoconductive semiconductor switch

Chen Hong, Wei Jinhong, Zeng Fanzheng, Jia Chenglin, Fu Zebin, Li Song, Qian Baoliang

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the theory of multiple avalanche domains, a two-dimensional numerical model for GaAs PCSS with opposed electrode structure is established. The influence of the width of the trigger region on the output characteristics of GaAs PCSS is investigated. Firstly, the switching transient of PCSS is analyzed. The results show that the rapid increase of the carrier concentration and the drastic evolution of the charge domain make PCSS operate in the ultrafast-switching mode. On this basis, this paper studies the influence of the width on the output characteristics of PCSS. The results show that the increase in the width can accelerate the rapid multiplication of carrier concentration and the rapid evolution of avalanche ionization domain, thus shorten the delay time and switching time of PCSS. Further more, the effects of different trigger positions on the delay time and switching time are analyzed. The results show that the delay time under cathode triggering is significantly lower than that under anode triggering, and the switching time is almost unaffected by the trigger position. The above conclusions can provide significant reference for the study on time jitter and synchronization of GaAs PCSS.

Key words: gallium arsenide, photoconductive semiconductor switch, opposed structure electrode, multiple avalanche domains, ultrafast-switching mode

光导开关(PCSS)具有高电压、超快速、低光能触发、低抖动等显著优点,在脉冲功率装置、高功率微波系统、太赫兹器件、超宽带雷达等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。通常情况下,PCSS有两种工作模式:线性模式和非线性模式。相对于Si基或SiC基的PCSS器件,GaAs PCSS可工作在线性模式,大大降低了开关导通所需的光触发能量,使开关利于工程实际应用^[3-5]。其异面结构GaAs PCSS可以延缓表面闪络,具有更高的耐压,更容易满足集成化要求,该种结构已被众多研究者广泛采用^[6-7]。

近年来,研究者围绕触发GaAs PCSS光斑的变化对PCSS输出特性影响开展了大量研究。2010年,袁建强等人使用不同形状的光斑(包括面状、线状和点状光斑)触发GaAs PCSS并进行了光电导特性的比较,讨论了触发光

* 收稿日期:2023-05-11; 修订日期:2023-08-30

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金项目(SKL 2021KF05)

联系方式:陈 红, 1281411534@qq.com。

通信作者:李 嵩, song_li206@163.com。

参数对光导开关特性的影响,研究表明,贯穿正负电极的光斑更有利于 GaAs PCSS 的光电导,其光电转换效率更高^[8]。2014年,施卫等人用 1.6 μJ 激光二极管触发 GaAs PCSS,研究了矩形光斑的布局 and 触发位置对非线性模式电场阈值的影响^[9]。2015年,张恬等人研究了相同触发能量下不同形状光斑对 GaAs PCSS 延时抖动影响^[10]。导通时间和延迟时间是衡量 PCSS 输出特性的关键参数,围绕光斑形状和输出特性,进一步分析光斑形状变化对开关导通时间和延迟时间的影响对于开关时间抖动分析和同步研究工作具有重要意义。本文基于 TCAD 数值仿真软件建立了异面结构 GaAs PCSS 的二维数值计算模型。首先研究了 GaAs PCSS 的瞬态导通特性,分析其导通过程中雪崩电离畴的动态演化过程,在此基础上,研究了触发区域宽度对 GaAs PCSS 的输出特性的影响,结果表明增大触发光斑的长度(触发区域宽度)可导致更短的延迟时间和导通时间。进一步地,本文对触发位置变化对开关输出特性的影响进行了分析和讨论。

1 二维数值计算模型及模拟电路

PCSS 瞬态特性的分析依赖于对基本半导体方程的求解以及参数模型的使用。其中,电流密度的计算基于漂移扩散理论,该理论涉及到载流子连续性方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n + G_n + G_0 - R_n \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p + G_p + G_0 - R_p \quad (2)$$

和输运方程

$$\mathbf{J}_n = qn\mu_n \mathbf{E} + qD_n \nabla n \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_p = qp\mu_p \mathbf{E} - qD_p \nabla p \quad (4)$$

式中: n 和 p 分别为电子浓度和空穴浓度, q 为电荷量, \mathbf{J} 为电流密度, G 和 R 分别为载流子产生率和复合率,下标 n 和 p 分别代表电子和空穴, G_0 为光致载流子生成率, D 和 μ 分别代表扩散系数和迁移率, \mathbf{E} 是表示电场强度。电场分布的求解可以由泊松方程实现

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -q(p - n + N_{ID} - N_{IA}) \quad (5)$$

式中: ϵ 为介电常数, φ 为静电势, N_{ID} 和 N_{IA} 分别为电离施主陷阱和电离受主陷阱的浓度。

泊松方程采用集总边界条件求解

$$\frac{V_{\text{bias}} - V_s}{R} = \sum (J_n + J_p) \quad (6)$$

式中: V_{bias} 是施加的偏置电压, V_s 是 PCSS 两端的电压。

本文采用 Selberherr 碰撞电离模型^[11] 给出 G_n 、 G_p 。光致载流子生成率 G_0 主要受触发光强和半导体材料性质影响,由文献 [12] 中给出的表达式给出。对于非线性特征的研究,电子的负微分迁移率模型也必须考虑在内,本模型 S. N. Vainshtein 给出的表达式为^[13]

$$\mu_n(E) = k_\mu \left[\mu_{n0} + \frac{v_{sn}}{E_c} \left(\frac{E}{E_c} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{E}{E_c} \right)^4 \right] \quad (7)$$

空穴的迁移率

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left(1 + \frac{\mu_{p0} E}{v_{sp}} \right) \quad (8)$$

式中: E_c 为阈值电场场强; μ_{n0} 和 μ_{p0} 分别为低电场下的电子和空穴迁移率; v_{sn} 和 v_{sp} 分别为电子饱和速度和空穴饱和速度; k_μ 是修正项,可表示为

$$k_\mu = a + b \exp(-E/E_0) \quad (9)$$

式中: $a=0.576$, $b=0.49$, $E_0=1.5 \times 10^5$ V/cm。

此外,模型中使用玻耳兹曼统计^[14], D_n 和 D_p 由爱因斯坦关系给出,在热平衡条件下为^[15]

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{q} \quad (10)$$

式中: k_B 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度。

基于上述物理模型和 TCAD 数值仿真软件, 用于研究瞬态特性的 SI-GaAs PCSS 的二维数值计算模型及模拟电路如图 1 所示, 其中, L 、 T 、 L_c 分别为晶片长度、晶片厚度和电极长度, 在仿真中分别设置为 $24 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$, 晶片宽度为 $5 \mu\text{m}$ 。触发光均匀照射晶片上表面中间位置, 触发光波长为 870 nm , 触发区域宽度 W 设为 $3 \mu\text{m}$, 触发光能量为 $3 \mu\text{J}$ 。异面结构与负载电阻 ($R_L=50 \Omega$) 串联, 并由直流电压源提供偏置电压 $V_a=87 \text{ V}$ 。

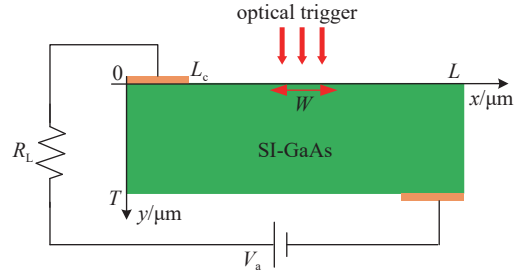


Fig. 1 GaAs PCSS analog circuit
图 1 GaAs PCSS 模拟电路

2 GaAs PCSS 的瞬态导通特性

异面结构 PCSS 具有超快速导通特性, 可以从延迟和导通两个阶段来对 PCSS 的导通瞬态进行描述。

图 2 为 $W=3 \mu\text{m}$ 时 PCSS 延迟阶段和导通阶段不同时刻的电场分布。当光脉冲触发 PCSS 中间区域时, 光注入区吸收光子产生电子-空穴对, 电子和空穴分别在外电场作用下向阳极和阴极漂移, 电极两端产生高电场区, 在两个高电场区之间出现一个电场屏蔽区。光脉冲于 $t=0.5 \text{ ns}$ 时刻注入, 在 $t=1.1 \text{ ns}$ 时, 阴极附近电场强度可达 300 kV/cm 以上(图 2(a))。强电场促使载流子发生碰撞电离, 从而使 PCSS 电流通道内的载流子浓度增加, 当电流通道内局域电场强度超过 E_c 时, 电子在漂移过程中形成空间积聚。根据 Kroemer 判据^[16]: 当载流子浓度与器件有效长度的乘积 (nL) 大于 10^{12} cm^{-2} 时, 在电子积聚的基础上能够形成稳定的空间电离畴, 图 2(b) 所示的电场分布中, PCSS 表面的平均载流子浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $nL=2.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 此时存在稳定的空间电离畴。电子积累形成的空间电离畴向阳极运动, 畴内载流子雪崩倍增, 等离子体浓度升高。等离子体浓度的提高使雪崩电离畴宽度减小, 从而导致畴两端电势差减小, 畴外电场区电场强度增大, 当光注入区附近电场强度再次大于 E_c 时, 会产生新的向阳极运动的电离畴, 而较早形成的雪崩电离畴尚未被阳极吸收。因此, 随着等离子体浓度提高, 形成了多个雪崩电离畴同时向阳极运动, 并使等离子体浓度加速提高(图 2(c))。显然, 在 PCSS 延迟阶段, 等离子体浓度和雪崩电离畴产生形成正反馈。

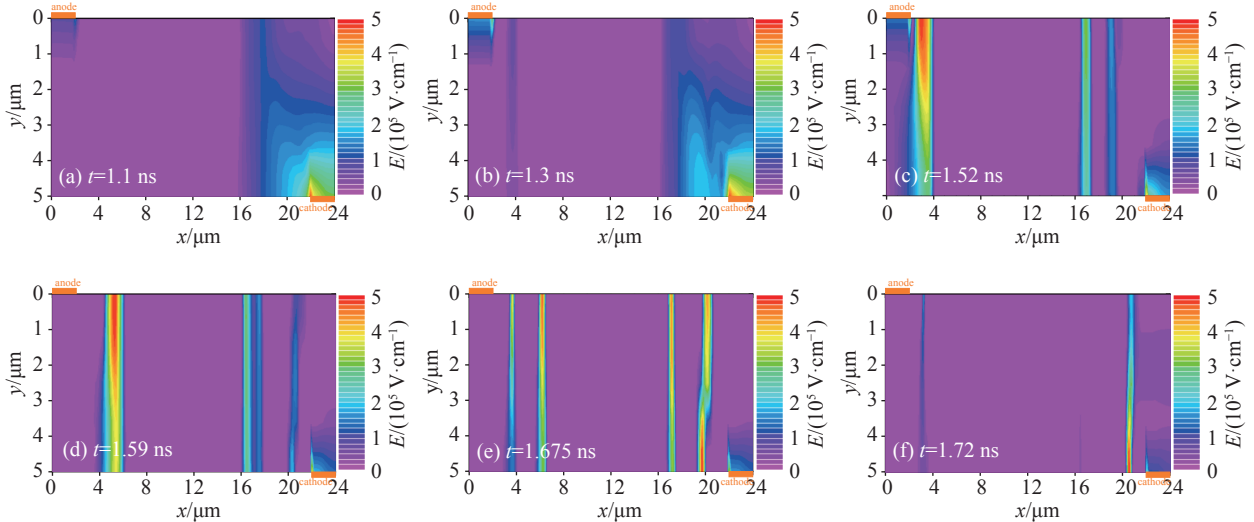


Fig. 2 Electric field distribution of PCSS in the delay stage and the switching stage when $W=3 \mu\text{m}$

图 2 $W=3 \mu\text{m}$ 时 PCSS 延迟阶段和导通阶段不同时刻的电场分布

当载流子浓度达到一定水平时, PCSS 开始工作在导通阶段。根据雪崩电离畴的演变特征, 导通阶段又可划分为两个阶段。在第一阶段, 畴宽度继续减小, 畴数量增多, 畴内峰值电场提高(图 2(d)和图 2(e))。但畴宽度急剧减小使 PCSS 两端电势差急剧降低, PCSS 两端电压下降, 流过的电流急剧增大。进入第二阶段, 该阶段 PCSS 两端电压被转移到负载电阻 R_L 上, 不足以产生新电离畴, 而旧畴被阳极不断吸收, PCSS 内畴数量越来越少(图 2(f))。

3 触发区域宽度对输出特性影响

3.1 宽度对延迟时间和导通时间影响

延迟时间与导通时间是决定 PCSS 输出特性的关键参数。根据前文的结论,载流子浓度快速增加导致电子空间积聚,并进一步发展为雪崩电离畴,因此,急剧增加的载流子浓度与快速演化的空间电离畴使 PCSS 工作在超快速导通模式下。本文研究了触发区域宽度 W 对 PCSS 延迟时间和导通时间的影响。PCSS 的延迟时间 t_d 定义为光脉冲注入时刻至开关电压下降至最高幅值 90% 的时间,导通时间 t_r 为 PCSS 电压由最高幅值 90% 下降至 10% 对应时间,如图 3 所示。开关导通后最大电流约 1.5 A,随后呈现出一定的电压锁定特征。

首先在 PCSS 中间区域施加光脉冲,保持触发光能量为 $3 \mu\text{J}$,图 4 给出了触发区域宽度 W 为不同值时,PCSS 的延迟时间与导通时间。可以得到,当 W 的宽度从 $2 \mu\text{m}$ 增加到 $6 \mu\text{m}$ 时,延迟时间和导通时间均下降。

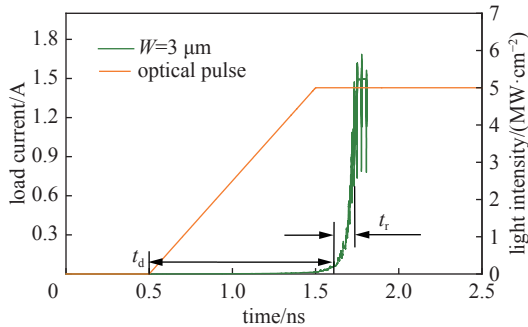


Fig. 3 PCSS current response with time when $W=3 \mu\text{m}$
图 3 $W=3 \mu\text{m}$ 时 PCSS 电流响应随时间变化

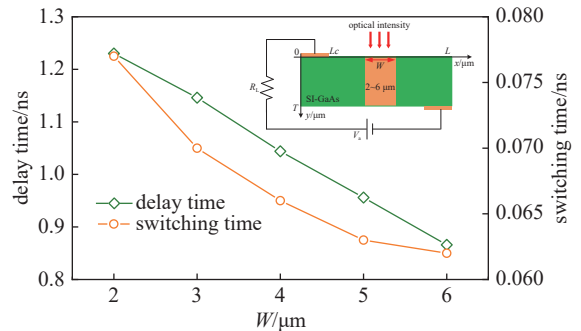


Fig. 4 Delay time and switching time of PCSS at different W
图 4 不同 W 下 PCSS 的延迟时间与导通时间

图 5 和图 6 分别为 $t=1.3 \text{ ns}$ 时,不同 W 下 PCSS 的电场分布和载流子浓度分布。可以看出, W 增加,PCSS 内雪崩电离畴演化速度加快,载流子浓度也随之增加。根据前文对 PCSS 的导通瞬态特性的分析可以得到,PCSS 从未被击穿到击穿的过程中,其内部畴的数量先逐渐增加后逐渐减少,载流子浓度是逐渐增加的。因此不同 W 下,1.3 ns 之前的 PCSS 内畴的数量会比 $t=1.3 \text{ ns}$ 时刻少,载流子浓度也更小,而 1.3 ns 之后的 PCSS 内畴的数量会比 $t=1.3 \text{ ns}$ 时刻更多,载流子浓度会更大,畴的数量以 PCSS 内畴的演化速度快慢而定。

表 1 列出了 $t=1.3 \text{ ns}$ 时, W 从 $2 \mu\text{m}$ 增加到 $6 \mu\text{m}$ 时,PCSS 表面平均载流子浓度和畴内最大峰值场强。可以得到,PCSS 表面的平均载流子浓度从 $7.31 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 上升为 $8.77 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,相应畴内的最大峰值电场强度从 72 kV/cm

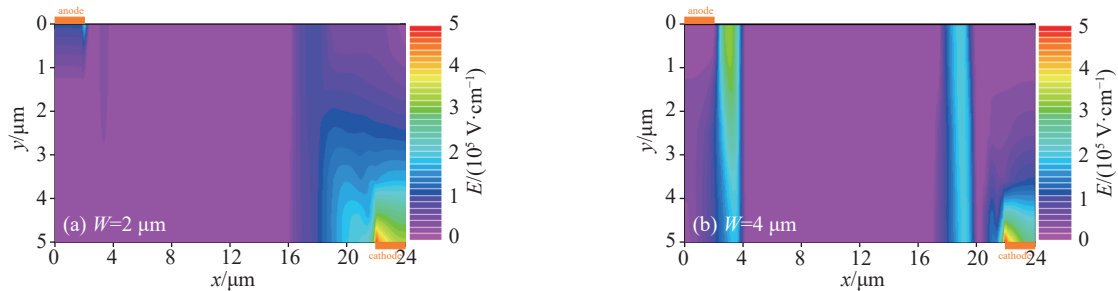


Fig. 5 Electric field distribution of PCSS at different W when $t=1.3 \text{ ns}$
图 5 $t=1.3 \text{ ns}$ 时,不同 W 下 PCSS 的电场分布

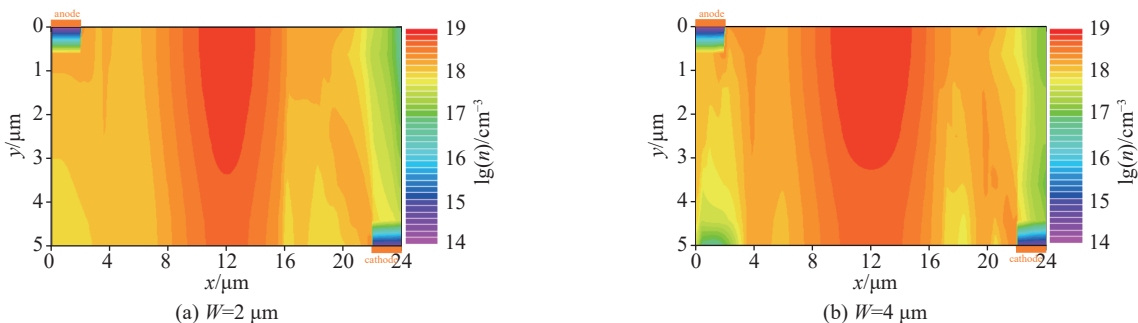


Fig. 6 Carrier concentration distribution of PCSS at different W when $t=1.3 \text{ ns}$
图 6 $t=1.3 \text{ ns}$ 时不同 W 下 PCSS 的载流子浓度分布

表 1 $t=1.3\text{ ns}$ 时不同 W 下 PCSS 表面平均载流子浓度和畴内最大峰值场强
 Table 1 At $t=1.3\text{ ns}$, the average carrier concentration on the surface of PCSS and the maximum peak field intensity in the domain at different W

width of the trigger region/ μm	average carrier concentration/ (10^{15} cm^{-3})	maximum peak electric field within the domain/ (kV/cm)
2	0.73	72
3	1.00	149
4	1.85	250
5	2.31	375
6	8.77	381

上升到 381 kV/cm。显然, 触发区域宽度 W 变大, 促进了载流子密度倍增和雪崩电离畴的形成, 并加快了雪崩电离畴的演化和载流子倍增速度, 进而缩短了 PCSS 的延迟时间和导通时间。

3.2 不同触发位置对 PCSS 特性影响

分别研究了阴极和阳极触发下, 触发区域宽度变化对延迟时间与导通时间的影响。图 7 为计算得到的不同 W 所对应的 PCSS 延迟时间和导通时间, 结果表明, 阴极触发下延迟时间明显低于阳极触发, 而导通时间几乎不受触发位置影响。与此相对应的, 阴极触发下, 触发区域宽度变化导致的 PCSS 延迟时间变化也明显比阳极触发情况下的要小。图 8 为 $W=4\text{ }\mu\text{m}$, 阳极和阴极触发下的 PCSS 在 $t=1.5\text{ ns}$ 时的电场分布, 可以得到, 在固定 W 和固定时刻下, 阴极触发的雪崩电离畴的演化速度比阳极触发情况下更快。

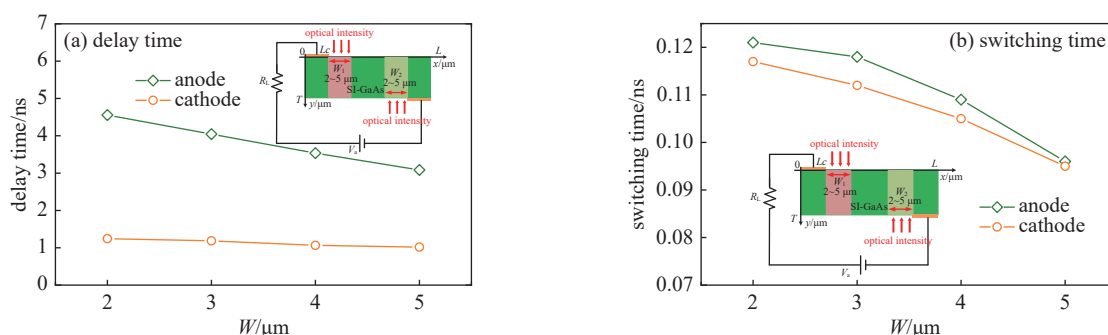


Fig. 7 Delay time and switching time of PCSS triggering at anode and cathode at different W

图 7 不同 W 下 PCSS 在阳极和阴极触发的延迟时间和导通时间

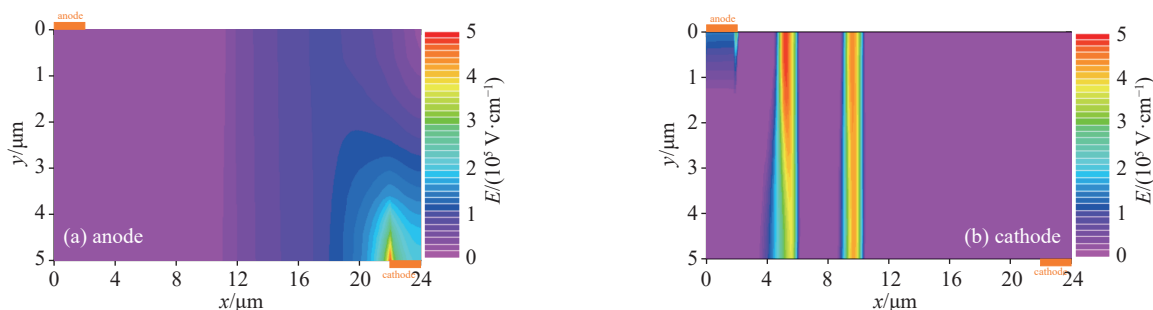


Fig. 8 When $W=4\text{ }\mu\text{m}$ and $t=1.5\text{ ns}$, the electric field distribution of PCSS when anode or cathode is triggered

图 8 $W=4\text{ }\mu\text{m}$ 且 $t=1.5\text{ ns}$ 时, 阳极或阴极触发时 PCSS 的电场分布

当光脉冲照射 PCSS 阳极时, 阳极受光区形成等离子体, 阴极处产生高电场区, 高电场区内碰撞电离产生的电子向阳极漂移。当光注入等离子区边界处的等离子体区形成时, 该区内电子向阳极漂移距离较短。根据 Kroemer 判据^[16]可以得到, 当电子漂移距离较短时, 需要更高的等离子体浓度才能满足畴形成条件, 从而导致延迟时间增大。在相同条件下, 相对于阳极触发, 阴极触发的电流通道内雪崩电离畴更早形成。因此, 采用阴极触发比阳极触发可获得更小的延迟时间, 该结论与文献 [7] 中得到的结论一致。多雪崩电离畴一旦形成, 正反馈环路将不断促进导通过程, 此时触发位置对 PCSS 导通瞬态的影响不再显著。在开关载流子浓度足够大的条件下, PCSS 导通时间的大小主要取决于外回路电气参数。

4 结 论

本文基于 TCAD 数值仿真软件,建立了 GaAs PCSS 的二维数值计算模型,对触发区域宽度对砷化镓光导开关输出特性影响进行了研究。首先对 PCSS 瞬态导通特性的分析表明,载流子浓度和雪崩电离畴形成和演化之间存在正反馈过程,雪崩电离畴的动态演化实现了 PCSS 的超快速导通并影响 PCSS 的延迟时间和导通时间。基于此,本文研究了触发区域宽度对 PCSS 延迟时间和导通时间的影响。结果表明,触发区域宽度变大,会促进并加快载流子密度倍增和雪崩电离畴的形成,进而缩短 PCSS 延迟时间和导通时间。此外,分析了不同触发位置对延迟时间与导通时间的影响,证明了阴极触发的延迟时间明显低于阳极触发,而导通时间两者差别不大。相关研究对 GaAs PCSS 抖动分析和多通道同步研究工作开展具有参考价值。

参考文献:

- [1] Wang Langning, Liu Jingliang. Solid-state nanosecond pulse generator using photoconductive semiconductor switch and helical pulse forming line[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(12): 3240-3245.
- [2] Li Song, Gao Jingming, Yang Hanwu, et al. Investigation on dynamic properties of amorphous magnetic core stimulated by different driving voltages[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(10): 4536-4540.
- [3] Tian Liqiang, Shi Wei. Analysis of operation mechanism of semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 124512.
- [4] Xu Ming, Liu Rujun, Shang Xiaoyan, et al. High-gain operation of GaAs photoconductive semiconductor switch at 24.3nJ excitation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(6): 751-753.
- [5] Shi Wei, Wang Shaoqiang, Ma Cheng, et al. Generation of an ultra-short electrical pulse with width shorter than the excitation laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27577.
- [6] Schoenberg J S H, Burger J W, Tyo J S, et al. Ultra-wideband source using gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(2): 327-334.
- [7] Sun Yue, Hu Long, Dang Xin, et al. Investigation on the mechanism of triggering efficiency of high-power avalanche GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(11): 1646-1649.
- [8] 袁建强, 刘宏伟, 刘金锋, 等. 不同形状的光斑触发砷化镓光导开关[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 557-560. (Yuan Jianqiang, Liu Hongwei, Liu Jinfeng, et al. GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by laser spots with different profiles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 557-560)
- [9] Shi Wei, Jiang Huan, Li Mengxia, et al. Investigation of electric field threshold of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by 1.6 μJ laser diode[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 042108.
- [10] Zhang Tian, Liu Kefu, Gao Shijia, et al. Characteristics of GaAs PCSS triggered by 1 μJ laser diode[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 1991-1996.
- [11] Selberherr S. Analysis and simulation of semiconductor devices[M]. Wien: Springer-Verlag, 1984.
- [12] Hu Long, Xu Ming, Li Xin, et al. Performance investigation of bulk photoconductive semiconductor switch based on reversely biased $\text{p}^+-\text{i}-\text{n}^+$ structure[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(11): 4963-4969.
- [13] Vainshtein S N, Yuferev V S, Kostamoavaara J T. Ultrahigh field multiple Gunn domains as the physical reason for superfast (picosecond range) switching of a bipolar GaAs transistor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97: 024502.
- [14] 刘英洲, 韦金红, 王郎宁, 等. 同面电极砷化镓光导开关的导通特性[J]. *半导体技术*, 2023, 48(1): 10-17. (Liu Yingzhou, Wei Jinhong, Wang Langning, et al. Switching transient characteristics of GaAs photoconductive semiconductor switch with co-planar electrodes[J]. *Semiconductor Technology*, 2023, 48(1): 10-17)
- [15] 陈星弼, 陈勇, 刘继芝, 等. 微电子器件[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2018. (Chen Xingbi, Chen Yong, Liu Jizhi, et al. *Microelectronic devices*[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018)
- [16] Wei Jinhong, Li Song, Wang Langning, et al. Properties of switching transient in the semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch with opposed contacts[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, 50(10): 3635-3643.