

光电导开关工作模式的蒙特卡罗模拟^{*}

施 卫^{1)†} 贾婉丽¹⁾ 纪卫莉¹⁾ 刘 锴¹⁾

1) 西安理工大学应用物理系, 西安 710054)

2) 中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2007 年 1 月 18 日收到, 2007 年 3 月 23 日收到修改稿)

利用二维 ensemble-Monte Carlo 方法模拟了直流偏置的半绝缘 GaAs(SI-GaAs)光电导开关在飞秒激光脉冲触发下的两种工作模式. 结果表明: 当偏置电场低于耿氏电场(GaAs 为 4.2 kV/cm)时, 开关输出电脉冲呈线性模式; 偏置电场超过耿氏电场但触发光脉冲能量低于光能阈值, 光电导开关仍然表现出线性工作模式; 当偏置电场和触发光脉冲能量都超过非线性模式(“lock-on”模式)所需阈值, 开关呈现非线性模式; 在光子能量较高的激光脉冲触发下, 开关非线性模式所需光能阈值降低. 非线性工作模式源于光生载流子发生谷间散射, 并在开关体内局部区域形成高场区, 电场变化大, 弛豫时间长, 电脉冲呈现非线性.

关键词: 光电导开关, ensemble-Monte Carlo 方法, 工作模式, 负阻效应

PACC: 0660J, 4280W, 7240

1. 引 言

半导体光电导开关(photoconductive semiconductor switches, PCSS's)具有响应速度快, 触发动作小, 功率容量大, 同步控制精度高, 耐压能力强, 且不受外界干扰等优点, 在超快光电子学^[1-3]各领域中有广泛的应用背景^[4-6]. 应用之一是利用飞秒激光脉冲触发光电导开关(作为辐射天线)产生高功率太赫兹电磁波^[7-12]. 实验表明^[13], 光电导体材料参数确定的条件下, 相同的入射光能, 不同强度的偏置电场作用于光电导开关, 光电导开关的工作模式截然不同; 当偏置电场高于耿氏电场时(对于 SI-GaAs 约为 4.0 kV/cm), 用不同能量的光脉冲触发光电导体, 开关的工作模式也不相同. 线性工作模式物理机理很容易理解, 但非线性模式物理机理, 至今尚不完全清楚. 因此, 研究光电导开关工作模式的物理机理对非线性光电导开关的设计、制备以及用非线性光电导方法产生太赫兹波都具有重要意义.

本文利用二维 ensemble-Monte Carlo 方法^[14]对处于不同直流偏置的 Auston 型 SI-GaAs 光电导开关在飞秒激光脉冲触发下呈现的工作模式进行了模拟. 应用负阻效应分析了光电导开关非线性工作模式的

产生机理.

2. 开关工作模式及理论分析

典型的 Auston 型光电导开关结构如图 1^[15]所示, 光电导芯片及两个金属电极放置在微带传输线的衬底上, 并通过两端的同轴接头形成开关的输入与输出. 当给开关两端加直流偏置电场, 并用超短激光脉冲照射电极之间的光电导体芯片时, 在光电导体内能产生超快电脉冲, 同时向开关体外辐射出一定频率的电磁波^[16-18].

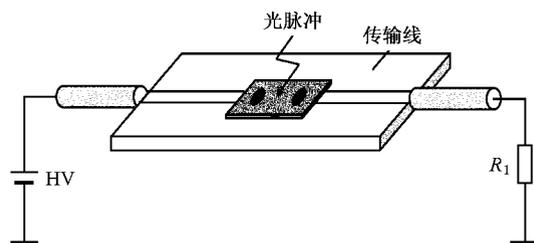


图 1 光电导开关结构示意图

光电导开关产生超快电脉冲的工作原理是: 如果触发光能或偏置电场强度低于一定的阈值, 超短激光脉冲照射光电导体芯片时, 则光电导体每吸收

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10390160, 10376025 和 50477011)和国家重大基础研究前期专项基金(批准号: 2004CCA04500G)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

一个光子可在体内产生一对电子-空穴对,电子-空穴对在偏置电场的作用下分别向两个电极漂移,使开关导通,触发光脉冲消失,开关关断,即传导过程由光脉冲决定.开关输出的电脉冲波形与触发光脉冲有着相似的波形,电脉冲的上升沿和脉冲宽度由光脉冲决定.如果开关材料载流子寿命低于介质弛豫时间,电脉冲的下降沿取决于载流子寿命,否则取决于开关材料本身的性质、开关体的形状和介质弛豫时间^[19].

当触发光能和偏置电场都超过一定的阈值,具有耿氏效应材料的光电导开关(如 GaAs, InP 等),产生的电脉冲将呈现非线性,光脉冲停止后,开关仍可处于导通状态^[15].

处于导通状态的光电导开关可以等效为随时间变化的电导(通态电导)和电容(通态电容)并联^[19]电路.通态电导 $\alpha(t)$ 可以表示为

$$\alpha(t) = \frac{1}{V_{\text{bias}}^2} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} d^3 r, \quad (1)$$

其中, V_{bias} 表示偏置电压, \mathbf{J} 表示传导电流矢量, \mathbf{E} 表示电场强度矢量.

实际上,开关体内的通态电流,是由位移电流和传导电流组成的.但位移电流很小,可以忽略^[20].如果用 $\mathcal{K}(t)$ 表示开关电流,则近似地有

$$\mathcal{K}(t) = V_{\text{bias}} \alpha(t), \quad (2)$$

那么,通态电流可以表示为

$$\mathcal{K}(t) = \frac{1}{V_{\text{bias}}} \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} d^3 r. \quad (3)$$

3. 模拟及讨论

3.1. 模拟模型

基于上面的理论模型,本文利用二维 ensemble-Monte Carlo 方法,对飞秒激光脉冲触发直流偏置下 SI-GaAs 光电导开关的导通电流进行了模拟.

假设两个电极之间的 SI-GaAs 光电导芯片尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,芯片被划分成 150×150 个网格.总的模拟时间为 5 ps,电场调节时间为 50 fs.

半绝缘 GaAs 导带的三个导带能谷 Γ, L, X 均为非抛物形结构,载流子能量与波矢之间的关系式为 $\epsilon(1 + \alpha\epsilon) = \frac{\hbar^2 \kappa^2}{2m}$.三个导带的散射机理^[21]包括极性光学散射、谷内及谷间声学形势散射,同时还包括了在低载流子浓度起重要作用的电离杂质散射以及在高载流子浓度下起重要作用的电子与电

子之间散射.本文假设空穴静止不动,因为空穴迁移率相对于电子迁移率可以忽略不计.

应用二维 ensemble-Monte Carlo 模拟时,我们近似认为空间网格中电流密度 $\mathbf{J}_{(x,y,t)} \approx \mathbf{J}_{(x,y,z=0,t)}$,电场强度 $E_{(x,y,t)} \approx E_{(x,y,z=0,t)}$.开关体通态电流可以表示为

$$\mathcal{K}(t) = \frac{1}{V_{\text{bias}}} \iint_S \mathbf{J}_{(x,y,t)} \cdot \mathbf{E}_{(x,y,t)} dx dy, \quad (4)$$

相应的电流密度为

$$\mathbf{J}_{(x,y,t)} = \frac{N_{(x,y,t)} q}{\Delta h_x \Delta h_y} \sum_{i=1}^{N_{(x,y,t)}} \bar{\mathbf{v}}_{(i,t)}, \quad (5)$$

这里 $\Delta h_x \Delta h_y$ 表示网格的面积, $N_{(x,y,t)}$ 表示网格内载流子数, $\bar{\mathbf{v}}_{(i,t)}$ 表示网格内第 i 个载流子在 t 时刻的平均漂移速度, q 为电子电量.

3.2. 模拟结果及讨论

3.2.1. 偏置电场对工作模式的影响

如果触发光波长 800 nm,单脉冲能量为 8 nJ,高斯型的触发光全脉冲半高宽(FWHM)为 100 fs,光脉冲聚焦成直径为 $10 \mu\text{m}$ 光斑照射在 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 开关芯片的中心处,偏置电场分别为 2 kV/cm, 10 kV/cm, 100 kV/cm,则模拟 SI-GaAs 开关电流随时间变化波形如图 2 所示.

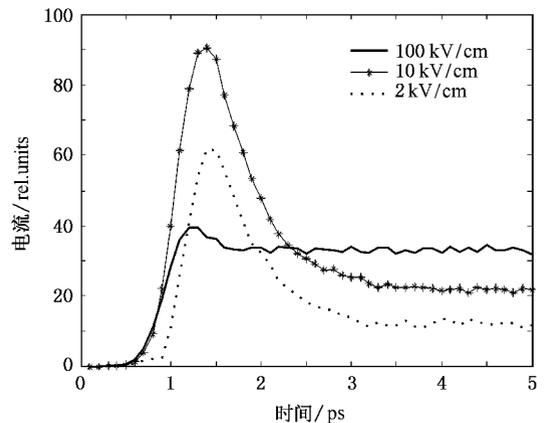


图 2 偏置电场分别为 100 kV/cm, 10 kV/cm, 2 kV/cm 作用下,开关间隙内通态电流

图 2 显示,在 2 kV/cm 和 10 kV/cm 偏置电场作用下,开关体内电流脉冲呈现线性模式,即电流脉冲与光脉冲呈现相似的高斯形分布.光脉冲结束,开关处于关断状态,且电流脉冲峰值都约在 1.5 ps 时刻出现.这说明开关间隙通态电流上升沿是由光脉冲决定的.通态电流下降沿受偏置电场影响,偏置电场

越高,下降沿的延迟时间越长.当偏置电场为 100 kV/cm 时,开关间隙通态电流的上升沿明显超前于低偏置电场作用下的通态电流上升沿,电流略微下降之后,电流值维持稳定值,即开关处于高导通状态,这种工作状态即所谓的“lock-on”工作模式.

显然,触发光能相同的条件下,偏置电场不同,SI-GaAs 开关的工作模式也不同.在 100 kV/cm 的强偏置电场作用下,即使是 8 nJ 的微弱触发光能,也可以使 SI-GaAs 开关工作在线性模式.模拟结果表明,用 Ti-sapphire 飞秒激光(单脉冲能量在 nJ 量级)作为触发源,只要半绝缘 GaAs 光电导开关的偏置电场达到 100 kV/cm 的量级,就可以工作于载流子具有雪崩倍增的非线性模式.

3.2.2. 触发光能对工作模式的影响

图 3 所示的 SI-GaAs 开关时域电流脉冲波形是在偏置电场为 10 kV/cm,触发光波长 800 nm,单脉冲能量分别为 8 nJ, 100 nJ, 200 nJ 条件下模拟得到的.光脉冲能量为 8 nJ 时,开关电流脉冲波形显示出线性模式;光能量增加到 100 nJ, 200 nJ 时,通态电流先出现高斯形脉冲,随后经过短暂的弛豫之后,电流脉冲逐渐升高,而呈现非线性.对比图 3 中三条电流曲线可以得出,随着光脉冲能量的增加,电流脉冲上升时间缩短,并且高斯形电流脉冲与后续电流上升之间的延迟时间缩短,高斯形电流脉冲峰值随光能增大而增大.这与文献 [13, 22] 实验结果的电流变化趋势是一致的.

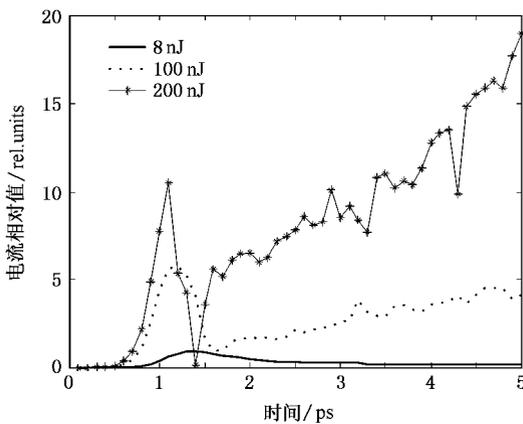


图 3 10 kV/cm 的偏置电场,不同能量的光脉冲触发,开关体内的通态电流

可见,当触发光脉冲能量低于相应偏置电场阈值时,开关工作于线性模式;当触发光脉冲能量接近或高于相应光能阈值时,开关将呈现出非线性临界

状态和非线性模式.即当偏置电场大于光电导材料耿氏电场时,开关的工作模式取决于触发光脉冲能量.

图 4 是 SI-GaAs 开关在偏置电场为 10 kV/cm,触发光能为 200 nJ 条件下,其内部的偏置电场和空间电荷电场叠加所形成的开关体内空间电场分布的时变图.图 4(a)所示为 1 ps 时刻空间电场分布,图中显示,光生载流子注入后,电子-空穴对的分离引起光电导体内电场发生畸变,由初始状态的均匀场裂变为非均匀场,同时由电子-空穴对分离所产生的空间电荷电场屏蔽了偏置电场^[23].图 4(b)所示为 2 ps 时刻空间电场分布,随着时间的推移,电子-空穴对进一步分离,空间电荷电场屏蔽效应加剧,此时,已有相当数量的光生载流子从电场中获得足够的能量从低能谷转移到了高能谷,也形成了开关体局部空间电场增强.图 4(c)所示为 4 ps 时刻空间电场分布,此图显示,高场区不断扩大,高场区电场已远远大于偏置电场.

在相同的偏置电场作用下,触发光脉冲能量大,光电导体产生的光生载流子数目相对多,因而开关空间电场分布变化相对快,所以在图 3 中,用 200 nJ 光脉冲触发开关,电流脉冲的上升沿相对较快.但由于电场非均匀性较强,载流子整体漂移速度减小也快,对应电流下降也相对快.电流下降到最低谷,实质是由于该时刻空间电场变化缓慢且载流子漂移速度经历过冲之后达到最小值形成.

之后,电子逐渐由低能谷跃迁到高能谷,漂移速度降低,同时位于高能谷的电子又不断堆积形成局部高场区,高场区电场的增强和范围的扩大,促使电流开始回升,高场区电场越强、范围越广,电流回升的幅度也越大.因此,对应于图 3 当光脉冲能量达到或超过其偏置电场所需阈值,开关工作状态显示出非线性.

3.2.3. 触发光波长对工作模式的影响

图 5 是波长 600 nm、单脉冲能量为 8 nJ、脉宽 100 fs 的光脉冲,聚焦成直径为 10 μm 光斑,照射在尺寸为 30 μm \times 30 μm 的 SI-GaAs 开关的中心,开关偏置电场为 10 kV/cm 时,开关的时域电流波形,显然开关处于非线性模式.对照图 2 的结果可见,在触发光能和偏置电场都相同的情况下,同样的开关被不同波长的光脉冲触发时,开关的工作模式不同.触发光波长为 800 nm 时,开关工作于线性模式;而用波长 600 nm 的光脉冲触发同一开关时,则是典型的

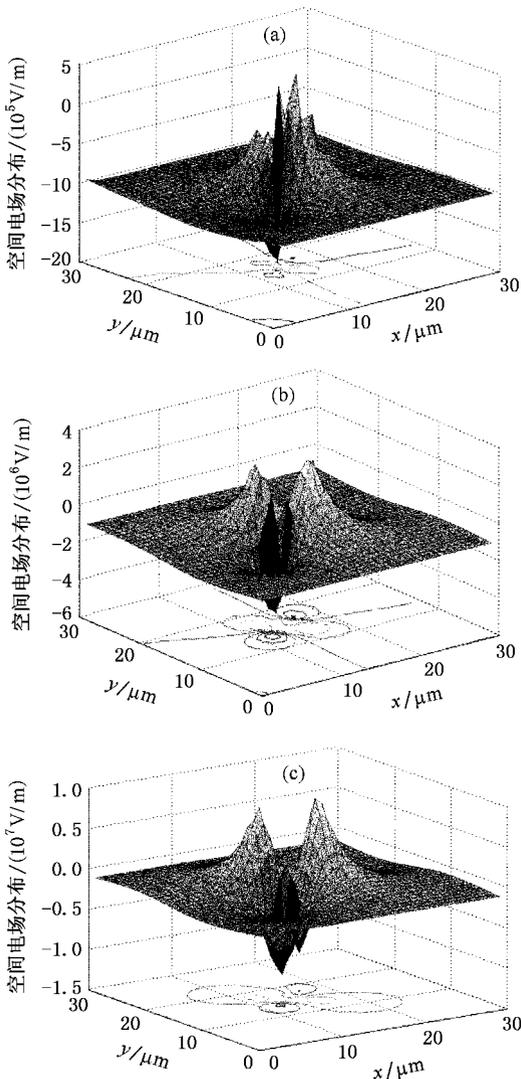


图4 10 kV/cm 的偏置电场 200 nJ 的触发光脉冲作用下,光电导开关体内电场分布 (a) 1 ps 时刻 (b) 2 ps 时刻 (c) 4 ps 时刻

非线性模式。

这是因为 600 nm 波长对应光子的能量为 2.0 eV 相对于 GaAs 禁带宽度 1.43 eV 高出 0.57 eV。高能量的光子被光电导体吸收后,引起价带电子向导带跃迁,形成高能光生电子。这些高能光生电子发生谷间散射的概率非常大,因而电子从价带跃迁到导带后在很短的时间内就可以跃迁到高于中心能谷 $\Gamma_{0.34}$ eV 的卫星能谷 L ,甚至直接跃迁到高于中心能谷 $\Gamma_{0.54}$ eV 的卫星能谷 X ,开关的负阻效应非常显著,导致开关电流脉冲呈现非线性。由此可见,光生载流子本身具有很高的能量时,相应的光能阈值减小。

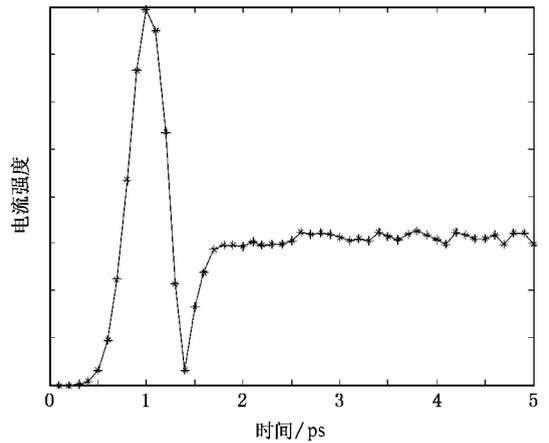


图5 600 nm 波长激光触发开关通态电流波形

4. 结 论

本文应用二维 ensemble-Monte Carlo 方法对 Auston 型半绝缘 GaAs (SI-GaAs) 光电导开关工作模式进行了模拟,分析了不同实验条件下开关呈现非线性工作模式的物理机理。

SI-GaAs 光电导开关在波长为 800 nm 单脉冲能量为 8 nJ 激光脉冲触发下,开关的工作模式随偏置电场强度不同而不同。在 2 kV/cm 低电场偏置下,开关电流脉冲呈现高斯形,即线性模式;在 10 kV/cm 的偏置电场作用下,开关体内电流脉冲仍表现出线性模式,在 100 kV/cm 的强场作用下开关表现出非线性模式。

保持偏置电场不变(10 kV/cm),改变 800 nm 激光触发光能,开关在低能量光脉冲触发下,呈现线性模式,在高能量光脉冲触发下,呈现非线性,并且触发光能越强,非线性越明显。说明开关在高于耿氏电场偏置下,工作模式受触发光脉冲能量限制。

在光子能量较高的激光脉冲触发下,开关非线性模式所需光能阈值降低。

由此可总结出:开关非线性模式,要求偏置电场高于耿氏电场,原因在于载流子能够从电场中获得足够的能量发生低能谷向高能谷的散射,形成负阻效应。对光能阈值的要求,实际上是需要绝对数量的载流子发生谷间散射,形成局部高场区,电场变化大,电场弛豫时间长,故电脉冲呈现非线性。

- [1] Cheng G H , Wang Y S , Liu Q , Zhao W , Chen G F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 436(In Chinese)[程光华、王屹山、刘 青、赵卫、陈国夫 2004 物理学报 **53** 436]
- [2] Wang X L , Wang Y , Zhai H C , Zhu X N , Mu G G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4613(In Chinese)[王晓雷、王 毅、翟宏琛、朱晓农、母国光 2006 物理学报 **55** 4613]
- [3] Hu M L , Wang Q Y , Li Y F , Wang Z , Zhang Z G , Chai L , Zhang R B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4243(In Chinese)[胡明列、王清月、栗岩峰、王 专、张志刚、柴 路、章若冰 2006 物理学报 **55** 4243]
- [4] Loubriel G M , Zutavern 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 Sci.* **2** 124
- [5] Islam N E , Schamiloglu E , Fleddermann C B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1988
- [6] Siders C W , Siders J L W , Taylor A J *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 241
- [7] Huggard P G , Cluff J A , Shaw C J , Andrews S R , Linfield E H , Ritchie D A 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2647
- [8] Weling A S , Hu B B , Froberg N M , Auston D H 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 137
- [9] Liu Y , Park S G , Weiner A M 1996 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2** 709
- [10] Budiarto E , Margolies J , Jeong S , Son J , Bokor J 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1839
- [11] Zhao G , Schouten R N , van der N V , Wenckebach W T 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 1715
- [12] Darrow J T , Zhang X C , Auston D H , Morse J D 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 1607
- [13] Shi W , Zhao W , Zhang X B , Li E L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 868(in Chinese)[施 卫、赵 卫、张显斌、李恩玲 2002 物理学报 **51** 868]
- [14] Ye L X 1997 *Monte Carlo simulation of small size semiconductor device*(Beijing : Science Press)(in Chinese)[叶良修 1997 小尺寸半导体器件的蒙特卡罗模拟(北京 科学出版社)]
- [15] Liang Z X , Shi W 1998 *Acta Electr. Sin.* **26** 104(in Chinese)[梁振宪、施 卫 1998 电子学报 **26** 104]
- [16] Shi W , Jia W L , Hou L , Xu J Z , Zhang X C 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1842
- [17] Shi W , Zhang X B , Jia W L , Li M X , Xu J Z , Zhang X C 2004 *Chin. J. Semi.* **25** 1735(in Chinese)[施 卫、张显斌、贾婉丽、李孟霞、徐景周、张希成 2004 半导体学报 **25** 1735]
- [18] Joshi R Pm , Dharamsi A H 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 3215
- [19] Auston D H 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 639
- [20] 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]
- [21] Fischetti M V , Laux S E 1988 *Phys. Rev. B* **38** 9721
- [22] Shi W , Dai H Y , Zhang X B 2005 *Chin. J. Semi.* **26** 460(in Chinese)[施 卫、戴慧莹、张显斌 2005 半导体学报 **26** 460]
- [23] Zhou X 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 706

Monte Carlo simulation of operating modes of semi-insulating GaAs photoconductive switches^{*}

Shi Wei^{1,2†} Jia Wan-Li¹⁾ Ji Wei-Li¹⁾ Liu Kai¹⁾

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

2 *State Key Laboratory of Functional Materials of Microsystems for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

(Received 18 January 2007; revised manuscript received 23 March 2007)

Abstract

An ensemble Monte Carlo simulation method has been employed to study the operating modes of semi-insulated GaAs (SI-GaAs) photoconductive semiconductor switches (PCSS) excited by a femtosecond laser pulse and biased in an electrical field. The results show that, under a bias field lower than the Gunn threshold field (which is 4.2 kV/cm for GaAs), or the optical pulse energy is below the optical threshold, the time-resolved current in the switch operates in the linear mode. When the bias field and triggering optical energy are respectively greater than the electrical and optical thresholds, the PCSS operates in the nonlinear mode. The simulation shows that when triggered by laser pulse with higher photon energy, the switch has lower optical threshold in the nonlinear mode. The mechanism of the nonlinear mode for the switch is concluded to be due to the inter-valley scattering of the photo-generated carriers, leading to local high field in the switch.

Keywords : photoconductive switches, ensemble-Monte Carlo simulation, operating modes, negative resistance effect

PACC : 0660J, 4280W, 7240

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10390160, 10376025, 50477011) and the Prophase Special Research Item of the National Important Foundational Research Project (Grant No. 2004CCA04500G).

[†] E-mail : swshi@mail.xaut.edu.cn