

# 半绝缘 GaAs 光电导开关亚皮秒传输特性的研究

贾婉丽,施 卫,纪卫莉,李孟霞

(西安理工大学理学院,陕西西安 710054)

**摘 要:** 本文应用 Ensemble-Monte Carlo 方法模拟了半绝缘 GaAs(SI-GaAs)光电导开关基于 Auston 等效电路亚皮秒传输特性.从载流子在开关体内的动态特性出发,研究了光电导开关在飞秒激光脉冲触发下光电导传输特性、电介质弛豫特性、开关储能特性以及开关工作模式;分析了非线性光电导开关对光能阈值和偏置电场阈值要求的物理机制.

**关键词:** 光电导开关; Ensemble-Monte Carlo 方法; 谷间散射; 负阻效应

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1795-05

## Studying of Subpicosecond Transmission Characteristic of Semi-Insulating GaAs Photoconductive Switches

JIA Wan-li, SHI Wei, JI Wei-li, LI Meng-xia

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

**Abstract:** Ensemble Monte Carlo method is used to simulate the time-resolved transmission characteristic of Semi-Insulating GaAs (SI-GaAs) photoconductive switches based on "Auston" equivalent circuit model. According to the dynamic performance of photo-generated carriers in the semiconductor, we study the transmission characteristics, dielectric relaxation properties, energy storage specialty and work modes of photoconductive switches triggered by femto-second laser pulses and analyze the physical mechanism that the nonlinear photoconductive switches have the threshold of optical energy and electric bias field.

**Key words:** photoconductive switches; Ensemble-Monte Carlo method; inter-valley scatter; negative resistance effect

### 1 引言

半导体光电导体开关以其独特的性能在超快电子学等领域有着广泛的应用背景<sup>[1~4]</sup>,其中应用之一就是利用飞秒激光脉冲触发光电导开关产生和探测高功率太赫兹脉冲波<sup>[5~10]</sup>.光电导体产生太赫兹波的产生效率及功率是限制太赫兹波应用的瓶颈之一,因此研究光电导体传输特性对提高光电导体产生太赫兹波产生效率及功率有重要的意义.

本文利用二维 Ensemble-Monte Carlo 模拟方法<sup>[11]</sup>对飞秒激光脉冲触发后的 Auston 型半绝缘 GaAs 光电导开关等效电路<sup>[12]</sup>时域特性进行了模拟.基于 Auston 型开关等效电路,分析了飞秒激光脉冲触发、直流偏置下光电导开关电极间隙内通态电导、通态电流、介质弛豫时间、储能电荷随偏置电场变化的关系.

### 2 理论分析

典型的 Auston 型光电导开关结构如图 1<sup>[13]</sup>,光电导

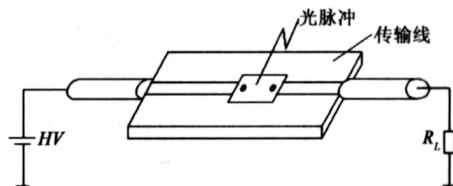


图1 光电导开关结构示意图

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,并用飞秒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瞬变的电脉冲,同时向开关体外辐射出太赫兹频率的电磁波.

直流偏置的光电导体在高斯型的飞秒激光脉冲照射下,一个脉冲宽度的时间内,光电导体内的光生载流子数目按高斯型增长,相当于一个电容器充电——电场能量的储存.同时由于偏置电场的作用,光生电子和空穴分离并分别向电极的两端运动,使光电导体从高阻态跃变成高通态.实际上,光生载流子在向两个电极漂移

过程中会发生各种散射及碰撞, 电场能量在储存的过程中也存在一个消散的过程, 因此光电导开关电路可以等效为通态电导和通态电容的并联电路, 如图 2 所示<sup>[12]</sup>. 我

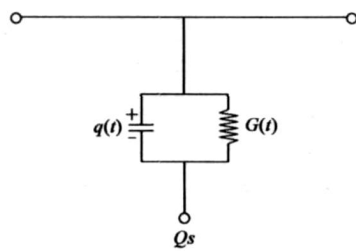


图2 光电导开关等效电路示意图

们近似认为光电导开关体内电场能量耗散率的关系式满足:

$\frac{1}{2} V_g^2 G(t) = \frac{1}{2} \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} d^3 r$ <sup>[14]</sup>, 因而通态电导可以表示为:

$$G(t) = \frac{1}{V_g^2} \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} d^3 r \quad (1)$$

电场能量储能的关系式近似满足:

$\frac{1}{2} V_g^2 C(t) = \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d^3 r$ , 因而通态电容可以表示为:

$$C(t) = \frac{1}{V_g^2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} d^3 r \quad (2)$$

其中,  $V_g$  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,  $\mathbf{D}$  表示电位移矢量. 假设光电导体是均匀介质, 电位移矢量与电场是线性关系, 即  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ , 通态电容进一步可以表示为:

$$C(t) = \frac{1}{V_g^2} \int |\mathbf{E}(r, t)|^2 d^3 r \quad (3)$$

光电导体在光脉冲照射前, 体内电场是均匀分布的, 在高光能非均匀照射下, 其体内局部区域产生大量的光生载流子, 光生载流子在电场力的作用下分别向电极两端运动, 形成空间电荷电场, 电场弛豫的时间即介质弛豫时间. 介质弛豫时间与光电导体几何形状及其光照存在一个复杂的函数关系, 可以近似地用电容和电导的比值表示:

$$\tau = C(t) / G(t) \quad (4)$$

在光电导体的等效电路中, 通态介质弛豫时间同样可用上式表示, 它表示了电场变化的时间. 由位移电流的定义可知, 电场变化率的大小决定了位移电流的大小, 而光生载流子的流动形成传导电流, 按照 Auston 对介质弛豫时间性质的诠释, 介质弛豫时间决定于电流的连续条件<sup>[12]</sup>.

### 3 模拟和讨论

#### 3.1 模拟模型

本文利用二维 Ensemble-Monte Carlo 模拟方法, 对飞秒激光脉冲触发、直流偏置的 SF GaAs 光电导开关超快

传输特性进行了模拟.

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

模拟中半绝缘 GaAs 导带的三个导带能谷  $\Gamma$ 、L、X 均为非抛物形结构, 载流子能量  $E$  与波矢  $k$  之间的关系式为:

$$(1 + \alpha) E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad \alpha \text{ 为非抛物性系数, } m \text{ 为有效质量.}$$

散射机制包括: 极性光学散射、谷内及谷间声学形变势散射, 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.

对于二维 Ensemble-Monte Carlo 模拟, 我们近似认为网格内的电流密度  $\mathbf{J}(x, y, t) = \mathbf{J}(x, y, z=0, t)$ , 横向电场  $E(x, y, t) = E(x, y, z=0, t)$ . 因而, 式(1)可以表示为:

$$G(t) = \frac{1}{V_g^2} \iint \mathbf{J}(x, y, t) \cdot \mathbf{E}(x, y, t) dx dy \quad (5)$$

式(3)表示为:

$$C(t) = \frac{1}{V_g^2} \iint |\mathbf{E}(x, y, t)|^2 dx dy \quad (6)$$

电流密度为:

$$\mathbf{J}(x, y, t) = \frac{N(x, y, t) q}{h_x h_y} \bar{v}(i, t) \quad (7)$$

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

对于开关间隙是恒定的偏置直流电压, 我们假设流过开关间隙的通态电流与电压之间满足下式:

$$I(t) = V_{\text{bias}} G(t) \quad (8)$$

因此, 流经电极间隙的通态电流与开关通态电导有相似的波形, 即通态电流与通态电导成正比.

与此类似, 开关间隙通态储能电荷  $Q(t)$  与电压之间满足下式:

$$Q(t) = V_{\text{bias}} C(t) \quad (9)$$

因而, 开关间隙通态电容所储存的能量可以用通态储能电荷表示, 存储的能量与电容成正比.

#### 3.2 模拟结果及讨论

模拟选择的实验条件为: 激光波长: 800nm, 脉冲宽度: 500fs, 单脉冲能量为 8nJ, 偏置电场分别为 2kV/cm、10kV/cm、100kV/cm.

图 3 三条曲线分别为 2kV/cm、10kV/cm、100kV/cm 偏置电场作用下载流子的平均速度随时间变化曲线图. 图 4 为三种偏置电场作用下光生电子在  $\Gamma$ 、L、X 三个能谷时域分布图.

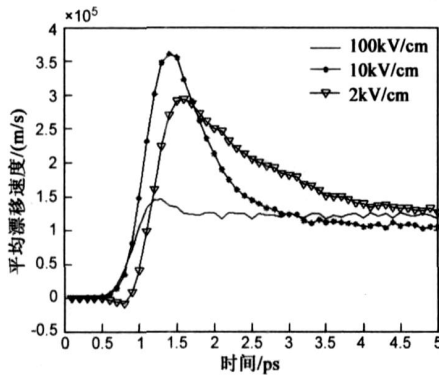


图3 偏置电场分别为100kV/cm、10kV/cm、2kV/cm作用下,载流子的平均漂移速度

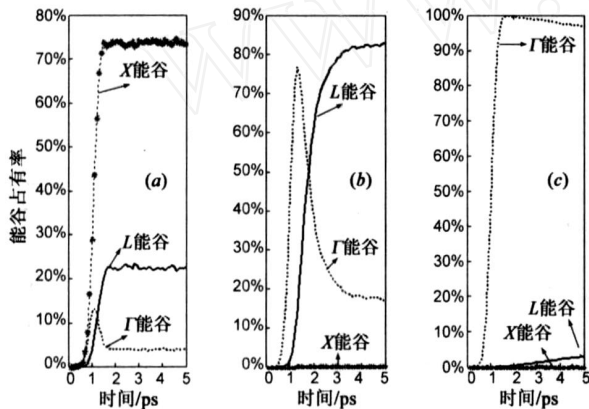


图4 光生电子在 $\Gamma$ 、L、X三个能谷占有率分布图。(a)偏置电场为100kV/cm;(b)偏置电场为10kV/cm;(c)偏置电场为2kV/cm

图3中偏置电场为2kV/cm平均漂移速度曲线显示,光生载流子在偏置电场为2kV/cm作用下,载流子经历1ps快速加速之后速度趋于稳定,速度达到 $2.0 \times 10^5$  m/s。在该偏置电场下光生载流子在三个能谷分布图4(c)显示,只有极少数载流子跃迁到卫星能谷L,绝大多数载流子在5ps的时间内分布于中心能谷 $\Gamma$ 。

图3中偏置电场为10kV/cm平均漂移速度曲线显示,光生载流子在偏置电场为10kV/cm电场作用下,速度出现了过冲现象<sup>[15]</sup>。载流子从最初速度为零开始加速,经历1ps之后速度达到 $3.7 \times 10^5$  m/s,经过0.8ps减速之后速度趋于稳定,速度维持在 $1.0 \times 10^5$  m/s。图4(b)中相应载流子在三个能谷分布图显示,1ps之后载流子逐渐从中心能谷 $\Gamma$ 转移到卫星能谷L,2ps之后一半以上的载流子分布于卫星能谷L,3ps之后80%的载流子转移到L能谷。对比2kV/cm偏置电场下的平均速度,可以得出高偏置电场作用下当载流子多数存在于中心能谷 $\Gamma$ 时,平均漂移速度要明显的高于低偏置电场作用下的平均漂移速度,但当载流子从电场中获得足够的能量后多数载流子转移到L能谷,而对应于同时期低偏置电场作用下的光生载流子从电场中得到的能量不足以发生这种谷间转移。由于中心能谷L的有效质量大,

所以随着大量的载流子转移到卫星能谷L,高偏置电场中载流子的平均漂移速度小于低偏置电场中载流子的平均漂移速度,对于耿氏器件表现出负阻效应<sup>[15,16]</sup>。

图4(a)中偏置电场为100kV/cm各能谷占有率曲线显示,在强场下光生载流子在极短的时间内(约100fs左右)即获得足够的能量而发生谷间散射,从中心能谷 $\Gamma$ 跃迁到卫星能谷L甚至跃迁到更高能级X能谷。在整个模拟时间内仅仅只有不到10%的光生载流子分布于中心能谷 $\Gamma$ ,大量的光生载流子分布于两个卫星能谷。在模拟时间为1ps左右,超过70%的光生载流子分布于卫星能谷X,23%的光生载流子分布于卫星能谷L。由于大量的光生载流子分布于两个有效质量大的卫星能谷,所以图3中100kV/cm偏置电场作用下光生载流子的平均漂移速度非但没有出现10kV/cm电场作用下载流子速度过冲现象,而且在模拟时间为3ps之前,载流子的平均漂移速度小于10kV/cm电场作用下的载流子漂移速度。3ps之后由于10kV/cm电场作用下的载流子多数也转移至L能谷,所以漂移速度略微高于相对低场作用下的载流子漂移速度。

图5为三种偏置电场作用下开关间隙内通态电导曲线图。图中显示,偏置电场越高,其开关体内通态电导越小。这是因为高场作用的光生载流子在获得足够的能量之后发生谷间散射,即由低能谷向高能谷跃迁,由于高能谷有效质量大,跃迁到高能谷的载流子迁移率大大减小,形成负阻效应。电场越大,跃迁到高能谷的电子数越多,负阻效应越显著,相应的通态电导越小,即电阻越大。

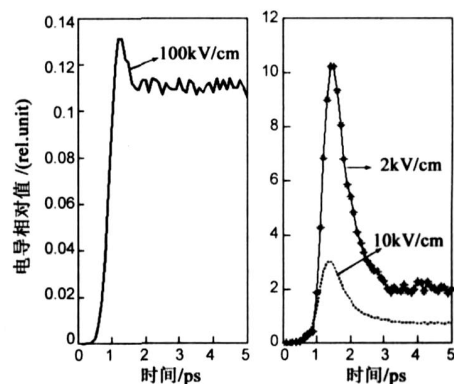


图5 偏置电场分别为100kV/cm、10kV/cm、2kV/cm作用下,开关间隙内通态电导

三个偏置电场下半绝缘GaAs光电导开关电极间隙内随时间变化的电流如文献[17]图2所示。

由式(4)计算通态介质弛豫时间可以得到图6所示的通态开关介质弛豫时间示意图。图中显示,偏置电场越高,介质弛豫时间越长。这是因为,高偏置电场下,载流子从电场中获得足够的能量,发生谷间散射,平均漂移速度降低,电场能量从一个准稳态到达一个新的准稳

态所需的时间变长. 电场越高, 转移至高能谷的电子数越多, 平均漂移速度越低, 介质弛豫时间越长. 介质弛豫时间决定了开关关断速度的快慢, 即决定开关体内电脉冲的下降沿.

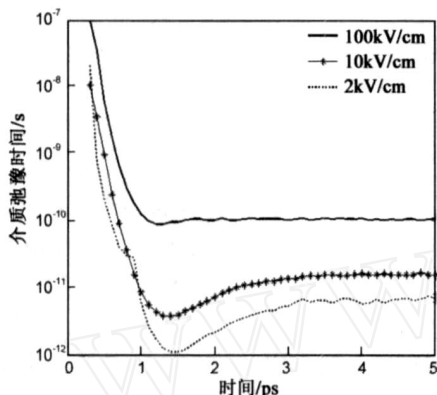


图6 偏置电场分别为100kV/cm、10kV/cm、2kV/cm作用下, 开关间隙内介质弛豫时间

图7表示的是开关间隙通态储能电荷示意图, 由图得出光脉冲能量一定的情况下, 开关间隙电容存储的能量随着偏置电压的增大而增大.

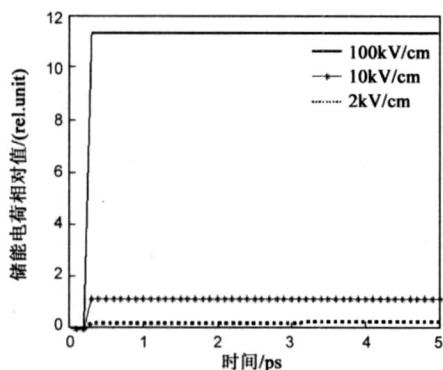


图7 偏置电场分别为100kV/cm、10kV/cm、2kV/cm作用下, 开关间隙内储能电荷

#### 4 结论

本文应用二维 Ensemble-Monte Carlo 方法对 Auston 型半绝缘 GaAs(SF GaAs) 光电导开关等效电路的时域特性进行了模拟和理论分析. 基于 Auston 型开关的等效电路分析了飞秒激光脉冲触发、直流偏置下光电导开关体内通态电导、通态电流、介质弛豫时间、储能电荷随偏置电场变化的关系.

SF GaAs 光电导开关在 2kV/cm 偏置电场作用下, 其体内光生载流子从电场中获得的能量不足以发生谷间散射, 所以载流子的平均漂移速度较高, 开关体内没有负阻效应, 所以相应的通态电导较之低场作用下的光电导体内的通态电导高, 介质弛豫时间短开关速度快, 但相应的通态储能电荷少.

SF GaAs 光电导开关在 10kV/cm 偏置电场作用下, 由于体内光生载流子从电场中获得足够的能量而发生

谷间散射, 载流子的平均漂移速度表现出过冲现象. 短时间内由于光生载流子从低能谷跃迁到高能谷的数量有限, 开关体的负阻效应没有强场作用下的开关显著, 开关体内的通态电导较之低场下的低, 较之强场下的高, 体内通态电流较之低场偏置的光电导体大, 介质弛豫时间相对长开关速度相对慢, 相应的储能电荷相对多.

SF GaAs 光电导开关在 100kV/cm 偏置电场作用下, 短时间内光生载流子即可从电场中获得足够的能量发生从低能谷跃迁到高能谷, 甚至更高能谷的谷间散射. 由于短时间内大量载流子跃迁到高能谷, 开关的负阻效应非常显著, 所以相应的通态电导、通态电流都较之低场偏置的开关体小, 介质弛豫时间最长, 开关处于非线性工作模式.

#### 参考文献:

- [1] 施卫, 马德明, 赵卫. 用光电导开关产生稳幅 ps 量级时间晃动超快电脉冲的研究[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1716 - 1720.  
Shi W, Ma D M, Zhao W. Generation of steady and jitter-free ultrafast electrical pulses with GaAs photoconductive switches [J]. Acta Phys. Sin., 2004, 53(6): 1716 - 1720. (in Chinese)
- [2] Shi W, Jia W L, Ji W L. Ultra-wideband electromagnetic radiation from GaAs photoconductive switches [J]. Chin J Semi, 2005, 26(11): 11 - 15.
- [3] 施卫, 纪卫丽, 赵卫. 用光电导开关产生超宽带电磁辐射的研究[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 891 - 1893.  
Shi W, Ji W L, Zhao W. Investigation of ultra-wideband microwave generation based on photoconductive semiconductor switches [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11): 1891 - 1893. (in Chinese)
- [4] 施卫, 张显斌, 贾婉丽, 等. 用飞秒激光触发 GaAs 光电导体产生 THz 电磁波的研究[J]. 半导体学报, 2004, 25(12): 1735 - 1738.  
Shi W, Zhang X B, Jia W L, Li M X, Xu J Z, Zhang X C. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse [J]. Chin J Semi, 2004, 25(12): 1735 - 1738. (in Chinese)
- [5] Huggard P G, Cluff J A, Shaw C J, Andrews S R, Linfield E H, and Ritchie D A. Coherent control of cyclotron emission from a semiconductor using sub-picosecond electric field transients [J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(18): 2647 - 2649.
- [6] Weling A S, Hu B B, Froberg N M, and Auston D H. Generation of tunable narrow-band THz radiation from large aperture photoconducting antennas [J]. Appl Phys Lett, 1994, 66(2): 137 - 139.
- [7] Liu Y, Park S G, and Weiner A M. Enhancement of narrowband terahertz radiation from photoconducting antennas by optical

- pulse shaping[J]. Opt Lett, 1996, 21(21): 1762 - 1764.
- [8] Budiarto E, Margolies J, Jeong S, Son J and Bokor J. High-intensity terahertz pulses at 1-kHz repetition rate [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(10): 1839 - 1846.
- [9] Zhao G, Schouten R N, van der N V and Wenckebach W T. Design and performance of THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter[J]. Rev Sci Instrum, 2002, 73(4): 1715 - 1719.
- [10] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H and Morse J D. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas[J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(6): 1607 - 1616.
- [11] 叶良修. 小尺寸半导体器件的蒙特卡罗模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1 - 400.
- [12] Auston D H. Impulse response of photoconductors in transmission lines[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1983, 19(4): 639 - 648.
- [13] 梁振宪, 施卫. 高压超快 GaAs 光电导开关的研制[J]. 电子学报, 1998, 26(11): 104 - 106.  
Liang Z X, Shi W. Fabrication of high-voltage ultra-fast photoconductive switches [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(11): 104 - 106. (in Chinese)
- [14] Zhou X, Tang T W, Seah L S, Yap C J and Choo S C. Numerical investigation of subpicosecond electrical pulse generation by edge illumination of silicon transmission-line gaps[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1998, 34(1): 171 - 178.
- [15] Cao J C, Lei X L, Multiphoton-assisted absorption of terahertz radiation in InAs/AlSb heterojunction[J]. Phys Rev B, 2003, 67(8): 085309-1-085309-5.
- [16] 施卫, 梁振宪. 高倍增超快高压 GaAs 光电导开关触发瞬态特性分析[J]. 电子学报, 2000, 28(2): 20 - 23.  
Shi W, Liang Z X. Analysis and characteristic of high-gain ultra-fast GaAs photoconductive switches [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(2): 20 - 23. (in Chinese)
- [17] 施卫, 贾婉丽, 纪卫莉, 刘锴. 光电导开关工作模式的蒙特卡罗模拟[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6334 - 6339.  
Shi W, Jia W L, Ji W L, Liu Kai. Monte carlo simulation of semi-insulating GaAs photoconductive switches operating modes [J]. Acta Phys. Sin, 2007, 56(11): 6334 - 6339. (in Chinese)

#### 作者简介:



贾婉丽 女, 1969 年出生于新疆, 2007 年获西安理工大学博士学位, 现为西安理工大学讲师. 研究领域为超快光电技术及其应用.

Email: wuli4@xaut.edu.cn

施卫 男, 1957 年出生于太原市, 1997 年获西安交通大学博士学位, 现为西安理工大学教授, 博士生导师, 研究领域为超快光电技术及其应用. Email: swshi@mail.xaut.edu.cn