

文章编号: 1006-4710(2011)04-0407-04

GaAs 光电导开关非线性锁定效应的机理研究

薛红^{1,2}, 施卫¹, 纪卫莉¹, 韩小卫^{1,2}

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054; 2. 渭南师范学院 物理系, 陕西 渭南 714000)

摘要: 根据光激发电荷畴模型, 研究强电场条件下, 半绝缘 GaAs 光电导开关体内热电子的瞬态输运过程及载流子与晶格相互作用的性质, 并对光激发单极电荷畴的形成、生长、输运及达到稳定平衡状态的全过程进行了分析。认为 GaAs 光电导开关的非线性锁定效应是光激发单极电荷畴处于稳定平衡状态时的必然结果, 同时, 电荷畴内部及前端的强电场区域伴随有热电子强烈的局部碰撞电离和辐射复合作用, 使载流子迅速“雪崩”倍增, 形成输出电脉冲的超快上升沿, 强电场区出现在 GaAs 光电导开关的阳极周围, 在电荷畴到阳极之间将发生强烈的碰撞电离和辐射复合发光, 形成丝状电流。

关键词: 光电导开关; 锁定效应; 光激发单极电荷畴; 非平衡载流子

中图分类号: TN256

文献标志码: A

Lock-on Mechanism in Nonlinear Mode of Photoconductive Switches

XUE Hong^{1,2}, SHI Wei¹, JI Weili¹, HAN Xiaowei^{1,2}

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. Department of Physics, Weinan Teachers University, Weinan 714000, China)

Abstract: According to photo-activated charge domain model, the transient transport processes of hot electrons and the nature of carriers-lattice interaction in the semi-insulating GaAs photoconductive switches with an ultrahigh electric fields is discussed; and the processes of producing and growth and achieved stable equilibrium state on photo-activated monopole domain is analyzed in details. The results indicate that the Lock-on effect in nonlinear mode of photoconductive switches is a stable equilibrium state of photo-activated charge domain(monopole domain), and simultaneously there are the strong local impact ionization and radiative recombination effect of hot electrons in the ultrahigh electric field internal and front-end of the monopole domain, where by making carriers “avalanche” quickly in multiplication and output electric pulse rising rapidly, the ultrahigh electric field appears near the anode region of GaAs photoconductive switches and strong impact ionization and radiative recombination of the hot electrons will occur so as to form current filaments.

Key words: photoconductive switches; lock-on effect; photo-activated monopole domain; non-equilibrium carriers

固态半导体开关具有工作频率高、使用寿命长、可靠性高等优点, 被逐渐应用于超快脉冲功率领域^[1-2]。对 SI-GaAs 光电导开关非线性 Lock-on 现象的研究有助于了解 GaAs 等 III-V 族材料 PCSS

电流持续存在的机理, 进而控制关断时间, 延长开关使用寿命。

目前, 已有一些理论模型对开关的非线性工作模式进行解释^[3-6], 但是对开关中电流快速上升的

收稿日期: 2011-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB310406); 国家自然科学基金资助项目(50837005, 10876026)。

作者简介: 薛红(1966-), 女, 陕西渭南人, 教授, 博士生, 研究方向为超快器件机理。E-mail: wxuehong@163.com。

施卫(1957-), 男, 浙江金华人, 教授, 博导, 研究方向为超快功率半导体器件及太赫兹技术。E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn。

导通过程以及 Lock-on 现象的内在机理尚未看到完善的理论解释。本文从辐射复合发光理论^[7]出发,结合光激发电荷畴模型^[8,9],对强电场作用下,半绝缘 GaAs 开关非线性状态时体内载流子形成电荷畴、输运、消散等过程及机理进行了详细分析。

1 Lock-on 工作模式

大量实验研究表明,强电场作用下的 PCSS 可工作在非线性模式,导通时存在电流输出的锁定现象。其典型特征为^[10]:①具有电场阈值和光能阈值;②触发光脉冲与电脉冲之间存在时间延迟;③具有超快电脉冲上升沿,其上升时间甚至比光脉冲上升时间短;④维持阶段存在稳定的 Lock-on 电场;⑤开关中存在丝状电流并伴随发光。

2 光激发电荷畴理论

2.1 光激发电荷畴模型

光激发畴模型^[8,9]的主要特点为:①光激发电荷畴是单极畴(电子畴);②畴的生成一定存在产生、生长和稳定的过程;③存在 Lock-on 电场;④在畴前部到阳极间形成高场区,并伴随强烈的碰撞电离和辐射复合发光;⑤当外电路控制使畴生存条件遭到破坏时,开关便恢复高阻状态。

2.2 形成稳定畴的条件

半导体的许多物理现象都是和过剩载流子相联系的。当以某种方式在半导体中注入载流子,使半导体内部的局部电中性平衡状态被破坏,形成空间电荷,而空间电荷所形成的电场必然迫使载流子运动直到重新恢复电中性。在这种空间电荷消散所需的弛豫时间极短的情况下,一般过程中无须加以考虑;而在电阻率很高的材料中(如 GaAs、InP 等 III-V 族化合物),空间电荷弛豫时间相当长,注入载流子的行为将很不相同,进而形成空间电荷畴(单极畴或偶极畴)。光激发电荷畴必须在满足以下条件时才可能产生:①高阻材料;②光激发产生浓度非均匀分布的载流子(光注入载流子);③偏置电场位于负微分电导区。以上只是畴产生的基本条件,但要形成稳定畴还必须同时考虑光注入非平衡载流子的浓度、外加的偏置电场以及合适的材料(器件)长度三个方面的因素,只有在三者同时满足一定的阈值条件下,光激发电荷畴才能发展成为稳定畴,保证稳定畴所必须的电压降决定维持阶段 lock-on 电场的存在。

由泊松方程和连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}, \quad \frac{d\rho}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{j}$$

可求得畴在样品中能够充分成长的条件为渡越样品的时间足够长^[11],即 $\frac{L}{v_d} \gg \tau_d$, 得到 $nL \gg 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。其中 n 为电子浓度, L 为器件长度, v_d 为饱和和漂移速度, τ_d 为弛豫时间。在强光触发条件下,光生载流子的浓度可以达到 10^{19} cm^{-3} 以上。因此,光生载流子的注入使畴的产生并达到稳定的条件得到满足。

3 光激发电荷畴输运及 Lock-on 效应分析

3.1 光注入载流子的瞬态过程

激光脉冲照射到半导体上时,在半导体内部瞬态地产生大量的光生载流子(电子—空穴对),激发能量完全转移给载流子,导致非平衡载流子密度的产生。其动力学过程大致可分为相干阶段、相位弛豫阶段和准热平衡弛豫阶段:①在相干阶段(几十 fs)内,电子和空穴都独立地与激光光场相互作用,不形成载流子;②半导体在经历了一个很短的相干阶段以后,就进入了相位弛豫阶段,电子由价带跃迁到导带,在半导体内部产生大量的电子—空穴对,时间为 ps 量级;③在相位弛豫阶段结束时的电子能量比热平衡能量高得多,形成热电子(由于电子与空穴的迁移率之比为 $\frac{\mu_n}{\mu_p} > 20$, 因此空穴对输出特性的影响较小,为简单起见,一般只考虑电子的输运情况),热电子主要通过发射光学声子弛豫到能带底部,准热平衡弛豫阶段结束。在经历 ps 时间以后,准热平衡弛豫阶段结束,电子和空穴各自分布在能带的底部,形成准平衡状态。在这个阶段,由于热电子(或非平衡载流子)的产生与光脉冲产生之间有 ps 量级的延迟,因而必然造成开关器件内触发光脉冲与输出电脉冲之间存在很短的时间延迟。

3.2 光激发电荷畴的产生及输运

在热平衡弛豫过程中,由于器件内光生热电子浓度的非均匀分布,非均匀热电子在偏置电场作用下向开关阳极方向漂移(电子、空穴在电场中分别向两极漂移,由于空穴的质量比电子大得多,畴内只考虑电子的漂移,忽略空穴的作用),激发初态时器件体内载流子的局部电中性被打破,形成空间电荷单极畴^[12](电子畴)。在理想的纯净半导体(本征半导体)中,光注入使光生非均匀电子浓度呈高斯分布,在电场作用下出现空间电荷,并在触发点处形成一个单极(电子)畴;而在杂质半导体中,由于掺杂浓度的不均匀性将引起光生电子浓度的多处不均匀

分布,在电场作用下将可能在各浓度不均匀处形成多个单极(电子)畴。

在大于阈值电场的强电场 E_b 作用下,电子进入负微分迁移率区域,如图 1 所示。

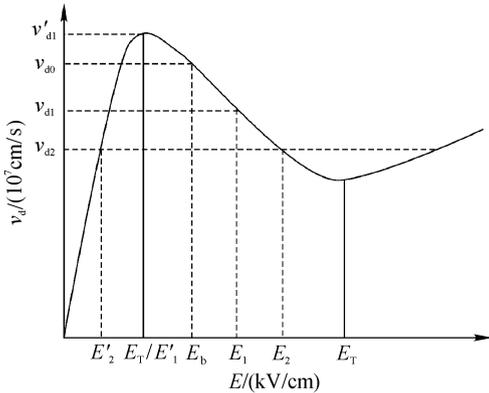


图 1 畴输运及生长过程中开关内载流子及电场分布示意图

Fig. 1 Transport and growth process of domain and electric field distribution

畴前部(向着阳极)电场增加(E_1),相应地畴后电场减小(E'_1),畴前后电子的漂移速度 $v_{d1} < v'_{d1}$,畴内电子浓度不断增加并向前部聚集,畴的宽度不断变短,并逐渐向阳极移动。这时畴内电子积累的速度越来越快,畴快速生长;随着畴内外电子浓度梯度的增加,畴前电场进一步增强,畴后电场也将相应减小,当小于耿氏阈值电场(E_T)时,畴内电子的积累速度会逐渐减慢,畴仍然继续生长,因此畴在向开关阳极渡越的过程中不断生长;但当畴后电场减小至 E'_2 ,畴前电场增加至 E_2 时(或是畴前后电场均进入正阻区),畴前后电子的漂移速度相等(均等于 v_{d2}),畴内电子浓度不变达到动态平衡,畴停止生长达到稳定状态,成长为稳定畴。此时器件内的载流子及电场分布如图 2 所示。畴前电场不断增加并达到稳定,形成高场区,出现 Lock-on 电场;畴后电场减至最小,并向着阴极方向按指数规律增加,到阴极附近增至 Lock-on 电场。当电路不能提供维持电场时,畴逐渐消失,器件内电中性恢复,材料恢复高阻状态,电脉冲消失。

在 Lock-on 电场达到可引起碰撞电离的强电场条件下($\sim 10^4$ V/cm),均匀触发的大量的光激发热电子($> 10^{19}$ cm $^{-3}$)可从电场中获得高于半导体能隙 E_g 的能量而成为高能热电子,这些高能的热电子可通过碰撞将价带的电子激发到导带中,产生新的电子-空穴对,载流子浓度迅速提高。载流子密度很高时,在强电场作用下,热电子能量分布不平衡将经受更强烈的散射,形成载流子的雪崩倍增。这个

过程可在 ps 量级的时间内使载流子浓度剧增,载流子进入高倍增机制,从而导致体内电流迅速增大(准热平衡弛豫对电流的增加也有一定的贡献),开关迅速导通,非线性模式进入引发阶段。因而强电场作用下的非线性输出波形的上升沿非常快,在 ps 量级。在非线性 GaAs 光电导实验中常观察到超快上升沿现象。

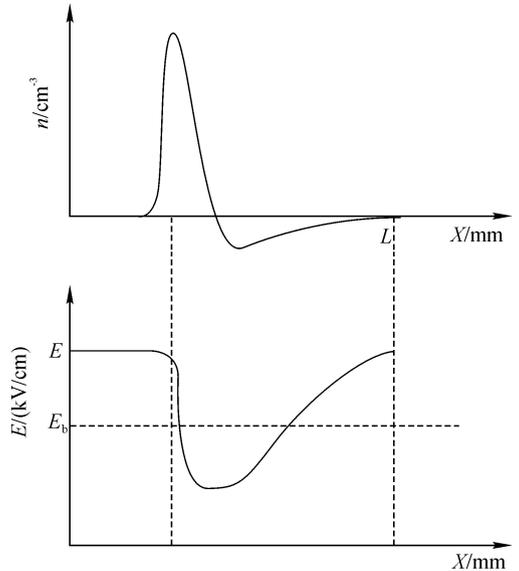


图 2 GaAs 光电导开关中电子的漂移速度随电场的变化情况

Fig. 2 The change of the electron drift velocity with electric field of GaAs photoconductive switch

3.3 畴的稳定平衡状态与 Lock-on 效应

在光激发单极畴向阳极方向运输的过程中(如图 1),畴前部的 lock-on 高场区内,到达阳极的电子漂移速度逐渐减小,开关电脉冲输出由极大值开始减小,当电子的漂移速度减小至 v_{d2} 时,进入阳极的电流密度保持不变,输出电流保持恒定,开关进入非线性模式的 Lock-on 状态。

上述讨论是在假定载流子寿命无限长的情况下进行的。事实上,GaAs 半导体材料中载流子的寿命一般为 ns 量级,并随着载流子浓度的增大而减小。因此,在光照停止后,非平衡载流子将不断复合而消失。但在可引起碰撞电离的强电场作用,并且热电子浓度极高的情况下,高场区内将发生强烈的辐射复合和碰撞电离,复合和产生两个相反过程在畴的形成、输运和平衡稳定的过程中,相互竞争^[13]。当电子的产生与复合速率相等时,输出恒定将维持 Lock-on 状态。但由于极高的热电子浓度存在,畴内载流子散射及辐射复合的影响,电脉冲的幅值会逐渐减小直到为零,如同“锁定”在一个固定值,即 Lock-on 状态。在高阻条件下存在空间电荷限制电

流,也将造成电脉冲的幅值逐渐减小^[10]。在 Lock-on 效应的初期,输出波形呈现出明显的规律性振荡,这是热电子效应引起的光电导振荡造成的^[14]。

畴充分生长起来以后依赖于触发电场强度,畴的生存决定于畴前后的电压,开关在导通状态下的偏置电压仅提供畴生存所需要的维持电场(Lock-on 电场)。当外电路使开关电场低于 Lock-on 电场强度时,畴的生存条件被破坏,开关电阻由于载流子的复合而恢复到触发前的状态。

4 结 论

根据上述分析可得以下结论:(1)在光触发初期到稳定畴形成之前,由于强电场条件及热电子的高浓度条件,光生电子—空穴对逐渐分离,局部电中性破坏,“光激发电荷(单极)畴”产生,在向阳极输运过程中生长并达到稳定平衡状态;(2)光激发单极畴在输运过程具有特征显著的两个阶段:输运初期,开关体内发生剧烈的局部碰撞电离作用,使载流子迅速“雪崩”倍增,输出电脉冲迅速上升,观察到超快上升沿现象;输运后期,进入阳极的电子漂移速度逐渐减小,最后保持稳定不变,开关体内电场分布及热电子输运处于稳定状态,对应非线性输出的 Lock-on 状态;(3)强电场区出现在阳极周围,在畴到阳极之间将发生强烈的碰撞电离和辐射复合发光,通常在阳极附近观察到电流丝,并且阳极容易最先出现损坏。

参考文献:

- [1] Zutavern F J, Loubriel G M, Omalley M W. High gain GaAs photoconductive semiconductor switches for impulse sources[C] //Process of Spiel Optically Activated Switching Conference IV, Boston, USA, 1994,2343:180-186.
- [2] Loubriel G, Zutaven F. Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive switches[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1997,11(7):318-322.
- [3] Partain L, Day D, Powell R. Metastable impact ionization of traps model for lock-on in GaAs photoconductive switches[J]. Applied Physics, 1993,74(1):335-340.
- [4] Brinkmann R P, Schoenbach K H, Stoudt D C, et al. Nonlinear behavior of optically activated switches at high electrical fields [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1991,38(4):701-709.
- [5] Zhao H, Hadizad P, Hur J H, et al. Avalanche injection model for lock-on effect in III-V power photoconductive switches[J]. Applied Physics, 1993,74(4):1807-1811.
- [6] Capps C D, Falk R. Time dependent model of optically

triggered GaAs switch [J]. Applied Physics, 1993, 74 (11):6645-6654.

- [7] 施卫,陈二柱,张显斌. 高倍增 GaAs 光电导开关中的单电荷畴[J]. 西安理工大学学报, 2001,17(2):113-116. Shi Wei, Chen Erzhu, Zhang Xianbin. Monopole charge domain in in high gain GaAs photoconductive switch [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(2): 113-116.
- [8] 施卫,梁振宪. 高倍增高压超快 GaAs 光电导开关中的光激发畴现象[J]. 半导体学报, 1999,20(1):53-57. Shi Wei, Liang Zhenxian. Optically activated charge domain phenomena in high gain ultra fast high voltage GaAs photoconductive switches[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(1):53-57.
- [9] 施卫,梁振宪. 高倍增高压超快 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 Wei, Liang Zhenxian. Analysis and characteristic of high gain ultra-fast GaAs photoconductive switches [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(2):20-23.
- [10] Shi W, Qu G h, Xu M, et al. Current limiting effects of photoactivated charge domain in semi-insulating GaAs photoconductive switch [J]. Applied Physics Letter, 2009,94: 072110.
- [11] 叶良修. 半导体物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2007:262-264.
- [12] 王馨梅,施卫,田立强,等. 光激发单极畴与耿氏偶极畴的物理机制比较[J]. 半导体学报, 2008,29(10): 1980-1983. Wang Xinmei, Shi Wei, Tian Liqiang, et al. Comparisons of photon-activated monopole domain and gunn dipole domain[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2008, 29 (10):1980-1983.
- [13] 施卫,王馨梅,侯磊,等. 高增益双层组合 GaAs 光电导开关设计与实验研究[J]. 物理学报, 2008,57(11): 7185-7189. Shi Wei, Wang Xinmei, Hou Lei, et al. Design and performanc of a high-gain double-layer GaAs photoconductive switch[J]. Acta Physica Sinica, 2008,57(11):7185-7189.
- [14] 施卫,薛红,马湘蓉. 半绝缘 GaAs 光电导开关体内热电子的光电导振荡特性[J]. 物理学报, 2009,58(12): 8554-8559. Shi Wei, Xue Hong, Ma Xiangrong. Characteristic s of photoconductivity o scillation in semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switches [J]. Acta Physica Sinica, 2009,58(12):8554-8559.

(责任编辑 杨小丽)