

高倍增高压超快 GaAs 光电导 开关中的光激发畴现象*

施 卫

梁振宪

(西安理工大学应用物理系 西安 710048) (西安交通大学电气工程学院 西安 710049)

摘要 本文首次报道了在临界触发条件下观察到的高倍增 GaAs 光电导开关中的光激发畴现象。分析了畴的产生与辐射发光在 Lock-on 效应中的作用。指出正是光激发畴的性质与行为决定了 GaAs 光电导开关高倍增工作模式的典型现象和特性。

PACC: 7220H; EEACC: 4250

1 引言

随着雷达、通信、激光核聚变等技术领域的迅速发展,对高压大功率超快电磁脉冲发生系统及其开关技术提出了更高的要求。半导体光电导开关(Photoconductive Semiconductor Switches, 简称 PCSS's)就是利用超快脉冲激光器与光电导体(如 GaAs、InP 等)相结合形成的一类新型器件。与传统开关相比,PCSS's 具有开关速度快、触发无晃动、寄生电感电容小、结构简单紧凑等特点,尤其是耐高压及其大功率容量使其在超高速电子学和大功率超快电磁脉冲的产生与整形技术领域如大功率亚纳秒脉冲源和超宽带(UWB)雷达及通信等领域具有广泛的应用前景^[1]。特别地,在强电场下由 GaAs、InP 等 III-V 族半导体制作的 PCSS's 存在高倍增(也称 Lock-on 效应或非线性)工作模式,所需触发光能由线性工作模式下的 mJ 量级降至 μJ 量级,因而超快大功率 PCSS's 可以由激光二极管阵列(LDA)替代庞大的 YAG 激光器触发,使得紧凑型大功率 PCSS's 成为可能^[2]。

高倍增工作模式的典型现象为^[3,4]: (1) Lock-on 效应的发生存在偏置电场阈值和触发光能阈值; (2) 触发光脉冲作用与开关导通之间的时间延迟; (3) 电流脉冲上升时间明显小于载流子以饱和速率在开关电极间的渡越时间; (4) 开关导通的维持阶段存在 Lock-on 电场; (5) 用光斑覆盖两电极的均匀照射触发和用透镜聚焦并加光阑的点触发两种方式都能使 PCSS's 出现 Lock-on 效应。强电场下 PCSS's 的高倍增工作模式表明当外界触发光脉冲消失后 PCSS's 内部存在新的载流子的产生与输运机制。

我们在系统的实验中首次观察到工作在高倍增模式下的 GaAs PCSS's 中存在一种类似于偶极畴(耿畴)的光激发畴现象,高倍增 GaAs PCSS's 的典型现象和特性都与光激发畴的性质与行为有密切关系。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59407006)

施 卫 男,1957 年出生,博士,副教授,主要从事光电物理器件、高功率超快固态光控开关方面的研究工作
1998-06-19 收到,1998-07-31 定稿

2 实验

横向 GaAs PCSS 的芯片材料选用半绝缘 GaAs, 厚度 0.6mm, 其暗态电阻率 $\rho > 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 、迁移率 $\mu > 5500 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 、两电极间隙 3mm, 放置在由聚四氟乙烯玻璃纤维复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。用超快激光脉冲照射芯片电极间隙以触发开关导通, 其结构示意图见图 1。用对撞脉冲主被动锁模 Nd:YAG 激光器 (ps) 作为触发源测试开关的性能, 测试线路见图 2。示波器是 Tek7934, 光能量计是 KSDP2210-CAS-1, TS100-40dB 同轴衰减器带宽为 0~4GHz。激光脉冲宽度 200ps 经 KTP 晶体倍频输出 $0.53 \mu\text{m}$ 的光脉冲, 用透镜聚焦使光斑直径约为 0.15mm, 并加光阑除去杂散光实现点触发, 触发光斑位于两电极中间。获得了 GaAs PCSS 在不同偏置电场和入射光能条件下的 Lock-on 电流波形^[4]。其中, 当开关偏置电场和相应的触发光能量在不同的阈值附近触发时, 得到一组开关电流波形上升形状呈现出一定规律的 Lock-on 电流波形。如图 3 所示。图 3(a)、(b)、(c) 和 (d) 所示的 Lock-on 电流波形是开关分别处在 8.9、9.2、9.7 和 11.0kV/cm 偏置电场下, 相应的触发光能量分别为 56、32、25 和 21 μJ 时得到的。实验测试时, 开关电场均大于最小触发电场阈值 4.1kV/cm, 而触发光能量则是与每一开关电场相对应的最小触发光能阈值。

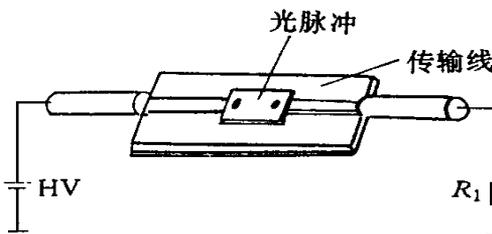


图 1 横向 GaAs PCSS 的结构示意图

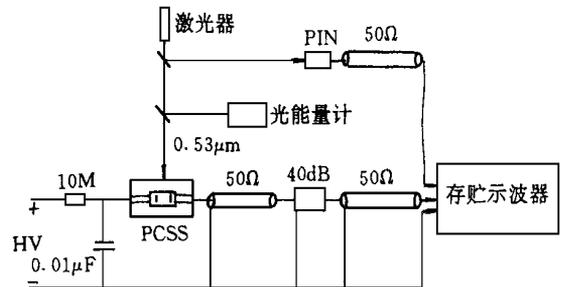


图 2 皮秒激光脉冲触发 GaAs PCSS 的测试线路

从以上电流波形可以看出, (1) 引发阶段中, 在不同的偏置电场和入射光能阈值附近, 其电流波形上升阶段均呈现出相同规律的脉动形状, 且脉动时间间隔都相等, 约等于 6~7ns。(2) 随着时间的演化, 电流脉动波形下降沿的底部逐渐抬高, 当开关内大电流密度形成后脉动现象消失。(3) 在相同的偏置电场下, 当触发光能低于或高于相应的阈值时, 都未表现出具有同一规律脉动形状的开关电流上升波形。

3 结果与讨论

强电场下 GaAs PCSS 的系统实验表明: (1) 只有当开关芯片材料的能级结构为多能谷时, 才会出现强电场下的高倍增模式。(2) PCSS 的触发电场强度阈值以及在维持阶段的 Lock-on 电场强度阈值均大于开关材料的负微分迁移率区的电场阈值 (耿氏电场强度)。

用不同工艺制备的 GaAs 材料的耿氏电场阈值有所不同, 一般在 3.2kV/cm 到 3.9kV/cm 之间, 均小于最小触发电场阈值。当 GaAs PCSS 工作在高倍增模式时, 由于电子从低能谷向高能谷的散射而导致负动态电阻效应 (NDR) 发生, 电子的漂移速度随电场的增大而

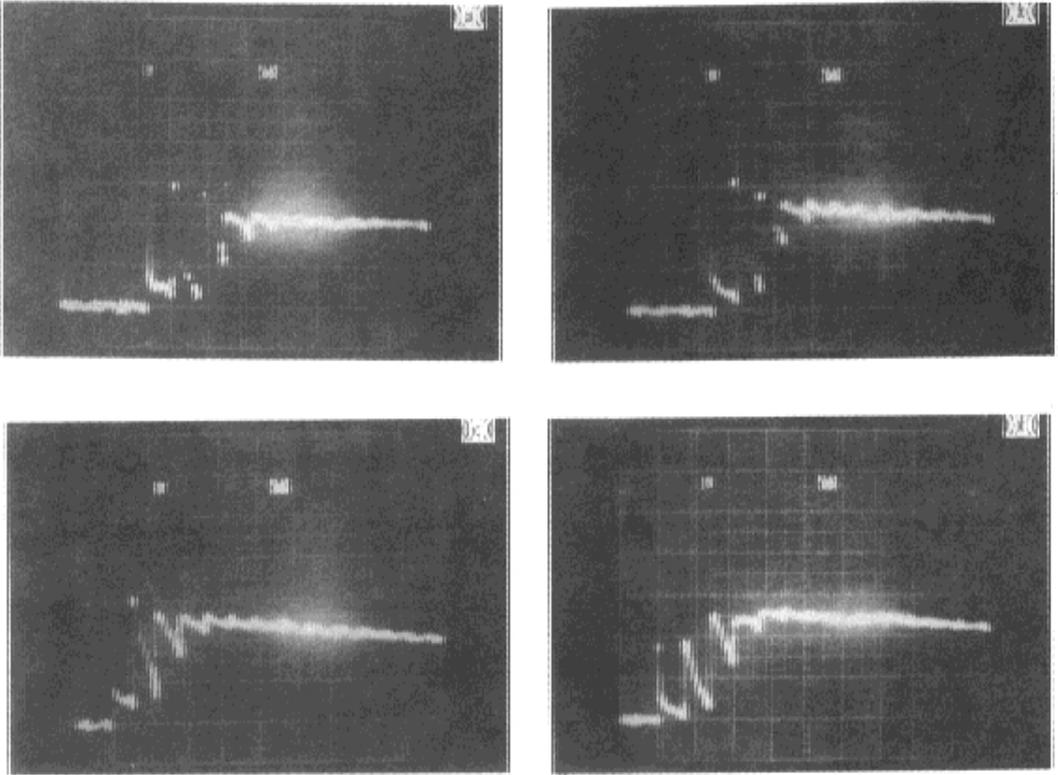


图 3 皮秒激光脉冲触发 GaAs PCSS 在不同光能、电场阈值附近触发时的 Lock-on 电流波形

横轴为时间 t : 5 ns/格, 竖轴为 50Ω 负载电压 V : 1 V/格;

偏置电场: (a) 8.9 kV/cm, (b) 9.2 kV/cm, (c) 9.7 kV/cm, (d) 11.0 kV/cm;

入射光能: (a) 56 μ J, (b) 32 μ J, (c) 25 μ J, (d) 21 μ J.

减小。此外,在强电场作用下,GaAs 中的光激发载流子被电场加速并可能达到足以使晶格原子电离的动能。被加速的电子与晶格原子发生非弹性碰撞作用,同时失去从电场中所得的一部分能量。如果每次碰撞损失的能量小于两次碰撞之间由电场所获得的能量,则电子的动能可以逐渐得到增加直至大于禁带宽度 E_g ,这种过程的结果可以使载流子的数目雪崩倍增并发生一部分电子-空穴对的复合而发射光子。

当 GaAs PCSS 加直流偏压使其电场强度大于耿氏电场阈值。实验用触发光波长 0.53 μ m、光脉冲能量为 21 μ J 时,光注入载流子浓度

$$n = \frac{4N}{\pi D^2 h} = 3.2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \quad (1)$$

式中 N 是能量为 21 μ J 光脉冲的光子数; D 为光斑直径; h 是 GaAs 的吸收深度。由于开关电极间隙 3mm,那么,光激发时载流子浓度与器件长度的乘积远大于 10^{12} cm^{-2} 。用光脉冲照射时在开关体内将引起电场畸变而形成了局部高电场区。光注入载流子的浓度分布、空间电荷电场分布以及合成电场的分布如图 4 所示。可见,由于光注入,开关体内形成了两个局部高电场区。以其中一个高电场区为例,并设该区外电场为偏置电场。由于外加偏置电场在 GaAs 材料的微分负迁移率区,根据速度-电场特性,在这里形成空间电荷层。即由光注入引起局部电场畸变而形成了以电子和空穴组成的空间电荷偶极层——高场畴。高场畴成核

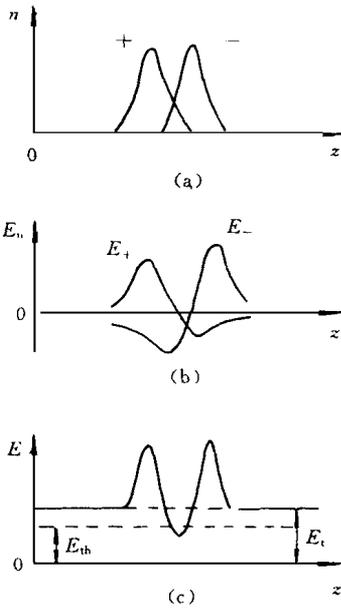


图 4 (a) 光注入载流子浓度分布;
 (b) 空间电荷电场分布;
 (c) 合成电场分布
 E_{th} : 耿氏电场阈值;
 E_1 : 偏置电场

后,畴内的正电荷和负电荷又产生一个方向与外加电场一致的附加电场,导致畴内电场进一步加强,而畴内电子的平均漂移速度不断下降,因此畴在向开关阳极渡越的过程中逐步生长,使得电子层不断积累而空穴层的宽度不断增加。但这一过程不会无限制的进行下去,因为在外加电压一定时,畴加宽和畴内电场的增高必然使畴外电场不断下降,当畴外电场降到使畴外电子的漂移速度和畴内电子的平均速度(也即畴的速度)相等时,畴就会停止生长而达到稳定。当畴漂移被开关阳极“吸收”时,对应于开关输出一个电流脉冲。这是入射光脉冲能量小于触发阈值时(即线性开关)的情形。

当入射光脉冲能量高于触发光能阈值,同时开关偏置电场也高于耿氏阈值电场并达到触发电能阈值,此时由光注入引起的高场畴内的电场强度急剧增大,使得在畴成核、生长的某一时刻,畴内电场已接近或达到 GaAs 材料的雪崩击穿强度。于是发生了强烈的碰撞电离使载流子雪崩倍增,与此过程相伴而生的还有和碰撞电离相关的辐射复合发射光子。这些光子越过雪崩电离区域向四周传播,并被 GaAs 材料再吸收。若 GaAs 自吸收区域的电场强度还没有低于触发阈值电场的话(对应于初始偏置电场大于触发阈值电场的情形),这种自吸收将再次触发新的高场畴并在那里发生雪崩

碰撞电离。这种光激发畴的重复再现便迅速在开关两电极之间形成了具有光控预击穿性质的电子-空穴等离子体通道,开关导通。辐射复合发光和再吸收替代了注入光脉冲消失后的可以移动的触发光源。这对应于开关工作在高倍增模式(或 Lock-on 效应)。

图 3 所示的电流波形是开关触发条件介于线性和高倍增模式之间的情形,对应于临界不稳定状态。最初的触发光能、电场条件能在 GaAs 中形成畴,但光注入载流子浓度却不足以使畴内的电场畸变达到本征击穿的程度而导致载流子雪崩倍增使开关迅速导通。又由于畴形成后开关偏置电场仍高于耿氏阈值电场,因而伴随的辐射复合发射光子在开关内能够激发新的畴,形成与偶极畴渡越模式相似的电流脉动。由于开关处于临界不稳定状态,导致电流脉动波形下降沿的底部逐渐抬高使开关进入高倍增模式。可计算出 GaAs PCSS's 中这种光激发畴移动的速度

$$v_d = \frac{0.15\text{cm}}{6.5\text{ns}} = 2.3 \times 10^7 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2)$$

这正是强电下载流子的饱和漂移速度。可见 GaAs PCSS's 中载流子穿越开关间隙是以光速(辐射复合发光在渡越时间中传播的距离)和载流子的饱和漂移速度(光激发畴在渡越时间中行驶的距离)按一定的比例进行的,所以开关电流脉冲上升时间明显小于载流子以饱和速率在开关电极间的渡越时间。当触发光能低于或高于临界触发条件时,对应于开关表现出线性模式或迅速进入高倍增(Lock-on)状态而难以观察到畴现象。由于强电场下光注入产生畴依赖于材料的负动态电阻效应(NDR),因而只有当开关芯片材料的能级结构为多能谷且触发电场、光能大于阈值时,才能观察到开关的高倍增工作模式。

4 结论

(1) 首次在临界触发条件下观察到 GaAs PCSS's 中的光激发畴现象。触发光脉冲制约着开关内局部电场畸变的急剧增加并结合材料的负阻效应而产生畴。在一定条件下, 因发生辐射复合发射光子并激发新的畴, 从而替代了外界触发光消失后新的触发光源, 形成了新的载流子雪崩倍增与输运机制。

(2) 强电场下 GaAs PCSS's 的高倍增模式或 Lock-on 效应的物理过程可以理解为: 强电场偏置下光注入 GaAs 产生电子-空穴对; 因负阻效应 (NDR) 的存在而形成光激发畴; 在一定的光电阈值条件下畴内电场达本征击穿强度; 畴内发生强烈碰撞, 电离使载流子雪崩倍增; 由碰撞电离决定的辐射复合成为触发光脉冲消失后的新光源; 辐射复合发光并被开关材料再吸收决定了开关电流脉冲上升时间明显小于载流子以饱和速率在开关电极间的渡越时间; 由光激发畴生存所必须的电压降决定了维持阶段 Lock-on 电场的存在; 当外电路控制使畴生存条件遭到破坏时 (畴电压降低于 Lock-on 电场) 开关电阻便恢复。

参 考 文 献

- [1] G. M. Loubriel, F. J. Zutavern and A. G. Baca *et al* , IEEE Trans Plasma Sci , 1997, 25(2): 124~ 130
- [2] S. D. Thibaut, SPIE , 1992, 1632, 167~ 176
- [3] A. Rose, F. J. Zutavern, High Power Optical Activated Solid-State Switches, 1st ed, Boston: Artech House, 1993, 252~ 257.
- [4] S. Wei, L. Z. Xian *et al* , 半导体学报, 1998, 19(6): 437~ 441.

Optically Activated Charge Domain Phenomena in High Gain Ultra Fast High Voltage GaAs Photoconductive Switches

Shi Wei

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Liang Zhenxian

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Received 19 June 1998, revised manuscript received 31 July 1998

Abstract Optically Activated domain obtained in GaAs photoconductive switch under critical triggering condition has been reported for the first time. The characterization of High gain ultra fast GaAs photoconductive switches can be described with an optically activated luminous charge domain. The formation, radiation transit and accumulation of the luminous charge domain are related with the triggering and sustaining phrases of GaAs photoconductive switches.

PACC: 7220H; EEACC: 4250