

高增益砷化镓光导开关中的光致电离效应

刘 鸿^{1,2} 阮成礼¹

(¹ 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; ² 成都大学电子信息工程学院, 四川 成都 610106)

摘要 研究了光致电离在高增益本征砷化镓(GaAs)光导开关(PCSS)中的效应。在高增益本征砷化镓光导开关中, 各级流注发展由三个过程组成: 光致电离、畴电子崩(DEA)和载流子碰撞电离雪崩生长。光致电离在本征砷化镓绝缘区中产生局部高载流子密度区域, 提供了允许畴存在的局域环境。光致电离包括激光触发和流注的复合辐射两种情形。分析了光导开关的最优触发激光条件。通过计算机数值模拟, 计算了在距离流注表面 $y \leq 30 \mu\text{m}$ 的范围内, 平均光生载流子密度 $n(t=0)$ 乘以该局域的特征尺度满足偶极畴成核条件: $n(t=0) \cdot y > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; 探讨了流注的复合辐射在流注周围产生非平衡载流子的规律; 发现了触发区域沿电场方向的长度阈值 L_{EC} , 触发区域的特征长度 L_{E} 必须满足条件: $L_{\text{E}} \geq L_{\text{EC}}$ 。

关键词 光电子学; 光致电离效应; 数值模拟; 饱和值现象; 空间阈值; 最优激光触发

中图分类号 TN303 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0496

Photo-Ionization Effects in High Gain Gallium Arsenide Photoconductive Semiconductor Switches

Liu Hong^{1,2} Ruan Chengli¹

(¹ College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² College of Electronic and Information Engineering, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China)

Abstract The photo-ionization effects in high gain intrinsic gallium arsenide (GaAs) photoconductive semiconductor switches (PCSS) are explored. In high gain GaAs PCSS, each stage in which the streamer is formed consists of photo-ionization and domain electron avalanche (DEA) and avalanche carrier growth. Photo-ionization effects create a local high carrier density region in which a local environment for the existence of the domain is provided. Photo-ionization effects include the laser trigger and recombination radiation originating from streamer. The optimum condition of optical trigger is discussed. It is computed that the recombination radiation produces excess carriers around streamer inside a local region about $y \leq 30 \mu\text{m}$ and the product of average carrier density $n(t=0)$ times characteristic length y is larger than 10^{12} cm^{-2} , namely $n(t=0) \cdot y > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The characteristics of photoionization effects of streamer are investigated. The space threshold L_{EC} (in the direction of electric field) of trigger region is found. The characteristic length L_{E} of trigger region must be larger than L_{EC} , namely $L_{\text{E}} > L_{\text{EC}}$.

Key words optoelectronics; photoionization effects; numerical simulation; saturation value phenomena; space threshold; optimum laser trigger

1 引 言

光导半导体开关已经被广泛应用于高功率光控电磁脉冲功率领域。潜在应用包括 THz 源、传感器、超宽带通信激光、半导体和等离子体诊断学等方面。高增益光导开关(PCSS)的物理机制对于光导

开关功率器件性能有重要的决定意义。1987 年以来人们对高增益光导开关工作的物理机制进行了一系列的实验^[1~4]和理论研究^[5~8]。但高增益光导开关的物理机制十分复杂, 这些研究没有形成完整、统一、自洽的理论。光致电离效应是高增益光导开

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国防探索项目(7130520)资助课题。

作者简介: 刘 鸿(1961—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: liuhong_68@126.com

导师简介: 阮成礼(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无线电物理方面的研究。E-mail: rcl@uestc.edu.cn

关的基本物理机制之一。这里研究了在本征 GaAs 光导开关的绝缘区内,触发激光和流注的复合辐射的效应及其特性。

2 基本原理

对于理想的本征 GaAs 材料,没有杂质和陷阱,在室温下,本征电子-空穴对密度为 $n_i = 2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ^[9],在 $n_i \cdot L \ll 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的区域内(其中 $L = 1.5 \text{ cm}$ 是光导开关间隙长度),一般不具备偶极畴成核的条件^[10]。高增益光导开关在工作时,所有非平衡电子-空穴对是光致电离和碰撞电离产生的。在高增益 GaAs 光导开关中,点触发激光的光致电离效应产生了局部高载流子密度区域,提供了允许畴存在的局域环境;当偏置电场 E 大于耿效应阈值 E_{th} 时,“畴电子崩”(DEA)(定义为正在生长的偶极畴与该移动畴前面的非平衡电子统一组成的结构)对光致电离产生的大量非平衡载流子进行局域积累,达到一定条件时,可能导致载流子碰撞电离雪崩生长,使该生长畴区域转变为静止的初级流注(在激光产生的触发区内形成的流注都是初级流注)。当初级流注离开触发区、进入光导开关间隙的绝缘区时,成为代替外界电离因子作用的辐射电离源,它发射的复合辐射(875 nm ^[1, 2])的光致电离,在其周围的一定范围内产生了大量的光电子-空穴对。在高电场条件下,第二代畴电子崩形成,引起载流子雪崩生长的第二代生长畴转变为第二级流注。在高增益光导开关中,这是一个自持的重复过程,直到各级流注发展连通两个电极,提供了一条导电通道,导致 lock-on 效应。

3 最优激光触发

在高增益 GaAs 光导开关中,触发激光必须产生一个局部高载流子密度区域(触发区域),提供允许畴存在的局域环境。在触发区域,载流子密度 n_{pe0} 乘以该局域的特征尺度 L_E 必须满足条件^[10]

$$n_{pe0} \cdot L_E > 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \quad (1)$$

设每一个被吸收的光子产生一对电子-空穴对,可以导出

$$N_{pe} = N_p \times [1 - \exp(-\alpha_p h)], \quad (2)$$

式中 N_{pe} 为被吸收的光子产生的非平衡光电子-空穴对总数, N_p 为触发激光能量包含的光子总数, α_p 为相应激光波长的吸收系数, h 为本征 GaAs 的吸收深度。照明光纤直径为 $2r = 1 \text{ mm}$, 点触发激光总

能量 $W_L = 1 \mu\text{J}$ 时,几种常用的激光波长触发效应如下。

当触发激光波长为 $\lambda_p = 532 \text{ nm}$ 时,光子的平均能量大约为 $E_p \approx 2.33 \text{ eV}$, GaAs 相应吸收系数约 $\alpha_{p1} \approx 7 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ^[9]。当 GaAs 的吸收深度大约为 $h = 3.4 \mu\text{m}$ 时,在照明区域决定的体积范围内,产生的电子-空穴对的平均密度大约为 $n_{pe} \approx 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。如果取 GaAs 的禁带宽度 $E_g = 1.42 \text{ eV}$, 则光电子可能具有的平均热动能为 $E_{pe} \approx 0.91 \text{ eV}$ 。由于大量光电子强烈的随机热运动和外加电场的作用,因此一方面非平衡载流子密度区域(触发区域)可能扩展而大于照明区域($L_E > 2r$);另一方面在触发区域内可能形成的初始空间电荷的平均密度 $n_{pe0} < n_{pe}$ 。

当激光波长为 $\lambda_p = 876 \text{ nm}$ 时,光子的平均能量大约为 $E_p \approx 1.42 \text{ eV}$, GaAs 相应吸收系数约 $\alpha_{p2} \approx 8 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ^[9]。当 GaAs 的吸收深度大约为 $h = 30 \mu\text{m}$ 时,在照明区域产生的电子-空穴对的平均密度大约为 $n_{pe} \approx 1.87 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。由于光电子相对于禁带宽度 $E_g = 1.42 \text{ eV}$ 的平均热动能为零,则可以认为触发区域的体积等于由照明区域决定的体积($L_E \approx 2r$)。在外加电场的作用下,可能形成的初始空间电荷分布 $n_{pe0} \approx n_{pe}$ 。

由(1)式和(2)式可以计算或估计,上面几种波长的激光触发,在触发区域内产生的空间电荷密度能够满足偶极畴成核条件: $n_{pe0} \cdot L_E > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。当触发激光的波长 λ_p 不同而总能量 W_L 相同时:光子能量越大,光子总数越少,吸收深度越小,载流子的平均热运动越强,致使触发区域的体积的不确定性越大,从而生长畴和可能形成的流注的位置具有较大的统计不确定性;大于带隙的光子能量越接近于带隙能量,产生的光电子-空穴对总数越大,吸收深度越大,载流子的平均热运动越小,导致生长畴和可能形成的流注的位置的统计不确定性小,适于控制。在同一位置触发光导开关的高增益工作模式,光子能量 E_p 越接近带隙能量 E_g , 需要的触发激光总能量越少。

4 流注的复合辐射效应

当初级流注在触发区中形成,进入本征砷化镓材料绝缘区时,成为代替外界电离因子作用的辐射电离源。假设流注近似为一个半径为 r_0 , 瞬时长度为 d 的圆柱体结构。由于光子辐射是各向同性的,因此从对称性考虑,在一个更大的同轴圆柱壳层范围 V_{eff} 内可能产生有效的局部高载流子密度区域

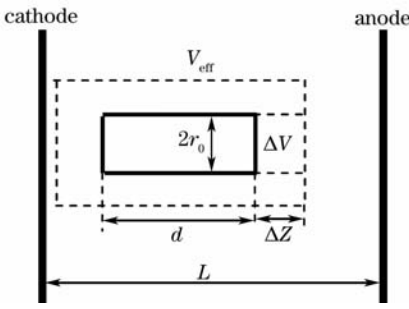


图 1 流注的光致电离效应区域和导致流注发展的一个典型区域 $\Delta V = \pi r_0^2 \Delta Z$ 的示意图

Fig. 1 Graphic illustration of photo-ionization effects and the typical region $\Delta V = \pi r_0^2 \Delta Z$

(见图 1), 提供允许畴存在的局域环境。设 y 为有效区域 V_{eff} 内任一点到流注外表面的距离, p 为流注内的空穴密度, τ_h (小于 100 ps^[11]) 为空穴的复合时间, η 为流注内单位体积的复合辐射系数, R_{out} 为发射在流注外面的光子比率, R_{rad} 为辐射源的任意辐射面积与总辐射面积的比率。由于复合辐射的光子具有同一波长 875 nm^[1, 2], 则相应的光吸收系数约为 $\alpha_{\text{ph}} \approx 8 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ^[9]。可以导出与流注相邻的无穷小体积 dV 内被吸收的光子数 dN_{effph} 为

$$dN_{\text{effph}} = R_{\text{rad}} \left(R_{\text{out}} \frac{\eta p}{\tau_h} \pi r_0^2 d \right) \times [1 - \exp(-\alpha_{\text{ph}} y)] dV, \quad (3)$$

考虑在流注前面半径为 r_0 , 长度为 $y = \Delta Z$ 的典型圆柱区域 $\Delta V = \pi r_0^2 \Delta Z$ 内 (见图 1), 流注的光致电离效应产生的平均载流子密度 $n(t=0)$ 。可以导出流注前面的辐射面积与总辐射面积的比率 R_{ahead} 为

$$R_{\text{ahead}} = R_{\text{rad}} = \frac{r_0}{2(r_0 + d)}, \quad (4)$$

设 $R_{e-\text{ph}} < 1$ 为吸收的光子只有一部分产生电子-空穴对^[12], 由(3)式和(4)式可以导出

$$n(t=0) = [1 - \exp(-\alpha_{\text{ph}} \Delta Z)] \times \frac{R_{e-\text{ph}} R_{\text{out}} \eta p r_0 d}{2(r_0 + d) \tau_h \Delta Z}, \quad (5)$$

选择参量值为 $\eta = 1/2$, $\tau_h = 100 \text{ ps}$, $R_{\text{out}} = 0.8$, $R_{e-\text{ph}} = 0.9$, $r_0 = 100 \text{ }\mu\text{m}$, $y = \Delta Z = 30 \text{ }\mu\text{m}$, 代入(5)式计算, 所得结果如图 2 所示。平均载流子密度 $n(t=0)$ 从零开始随流注长度 d 的增加而迅速增加, 随后这个增加逐渐变缓, 趋近于一个饱和值; 流注的空穴密度 p 越大, 平均载流子密度 $n(t=0)$ 的饱和值越大。进一步研究表明: 这是流注的光致电离产生的平均载流子密度 $n(t=0)$ 随流注长度 d 的变化而变化的一般规律, 且流注的半径 r_0 越大, $y = \Delta Z$ 越小, 平均载流子密度 $n(t=0)$ 的饱和值越大。图 2 表明一定长度

的流注的光致电离产生的平均载流子密度能够满足畴成核条件: $n(t=0) \cdot y = n(t=0) \cdot \Delta Z > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

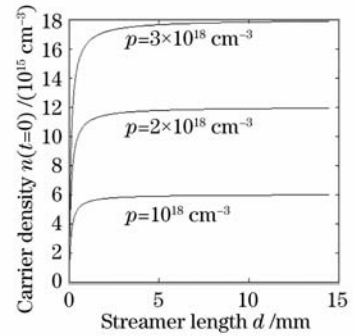


图 2 流注的光致电离在典型体积 ΔV 内产生的平均载流子密度 $n(t=0)$ 随流注长度 d 的变化规律。图示了流注的三个空穴密度值 p 的曲线

Fig. 2 Created average carrier density $n(t=0)$ as a function of the length d of streamer has been computed and plotted for different hole density p of streamer

在 p, r_0 一定时, 初级流注必须达到一定的长度才能在本征砷化镓材料的绝缘区内产生允许畴存在的载流子密度环境, 这个最小长度称为流注自持的临界长度 d_c 。在高增益光导开关中要求初级流注的长度 d_0 必须大于自持流注的临界长度 d_c , 即 $d_0 > d_c$ 。实验分别观察到流注直径为: $50 \text{ }\mu\text{m} \leq 2r_0 \leq 300 \text{ }\mu\text{m}$ ^[1] 和 $15 \text{ }\mu\text{m} \leq 2r_0 \leq 300 \text{ }\mu\text{m}$ ^[2], 可以计算当 $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $r_0 = 7.5 \text{ }\mu\text{m}$ 时, $d_c \approx 21.5 \text{ }\mu\text{m}$; $r_0 = 150 \text{ }\mu\text{m}$ 时, $d_c \approx 5.8 \text{ }\mu\text{m}$ 。可见 p 一定时, r_0 越大, d_c 越小。同样可以计算得到 r_0 一定时, p 越大, d_c 越小。在触发区域, 初级流注形成的位置和大小等都具有统计不确定性, 因此照明激光产生的触发区域, 沿电场方向的最小长度(空间阈值) L_{EC} 至少必须大于自持流注的临界长度 d_c , 即 $L_{\text{EC}} > d_c$ 。触发区域的特征尺度 L_E 必须满足条件 $L_E \geq L_{\text{EC}}$, 才可能形成自持的初级流注。

理论分析的结构对高增益光导开关的激光触发技术给出了明确的优化设计建议, 即对激光二极管阵列和一定芯径的光纤的耦合效应等技术设计方面^[13~17] 提出了优化要求。

5 结 论

讨论了易于控制的触发激光条件。一定长度的流注的复合辐射, 能够在流注周围产生允许畴存在的局域环境。流注的复合辐射产生的平均载流子密度随着流注的伸长而增加, 最后趋于饱和值。在高增益光导开关中, 局域激光触发除了存在能量阈值外, 还

发现了触发区域在电场方向的长度阈值 L_{EC} 。

参 考 文 献

- 1 Zutavern F J, Loubriel G M, O'Malley M W *et al.*. Characteristics of current filamentation in high gain photoconductive semiconductor switching [R]. IEEE Power Modulator Symposium, Myrtle Beach, SC, Conference Record of the 1992 Twentieth; 305~311
- 2 Loubriel G M, Zutavern F J, Hjalmarson H P *et al.*. Measurement of the velocity of current filaments in optically triggered, high gain GaAs switches[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(24): 3323~3325
- 3 Loubriel G M, Zutavern F J, Mar A *et al.*. Longevity of optically activated, high gain GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. *Plasma Science, IEEE*, 1998, Transactions on 26; 1393~1402
- 4 Zutavern F J, Baca A G, Chow W W *et al.*. Electron-hole plasmas in semiconductors [J]. *IEEE Pulsed Power Plasma Science*, 2001, **1**: 289~293
- 5 Capps C D, Falk R A, Adams J C. Time-dependent model of an optically triggered GaAs switch[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(11): 6645~6654
- 6 Zhao H, Hadizad P, Hur J H *et al.*. Avalanche injection model for the lock-on effect in high power Photoconductive switches[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(4): 1807~1812
- 7 Stout P J, Kushner M J. Modeling of high power semiconductor switches operated in the nonlinear mode[J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(4): 2084~2090
- 8 Kambourt K, Hjalmarson H P, Zutavern F J *et al.*. Simulation of current filaments in photoconductive semiconductor switches [R]. Proc. 15th International IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, 2005. 814~817
- 9 Blakemore J S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide[J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(10): R123~R181
- 10 Kroemer H. Detailed theory of the negative conductance of bulk negative mobility amplifiers, in the limit of zero ion density[J]. *IEEE, Transactions on Electron Devices*, 1967, **ED-14**: 476~492
- 11 Lee C H. Picosecond optoelectronic switching in GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(2): 84~86
- 12 Southgate P D. Recombination processes following impact ionization by high-field domains in Gallium Arsenide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(12): 4589~4595
- 13 Rao Haibo, Liao Yun, Cheng Jiangbo *et al.*. Laser diode-pumped passively Q-switched monolithic microchip laser based on liquid phase epitaxy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 90~93
饶海波, 廖云, 成建波等. 外延单处式激光二极管抽运被动调Q微激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 90~93
- 14 Wang Yanhai, Wang Jiangfeng, Li Xuechun. Laser pulse shaping and modification techniques in front-end of high-power laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 477~481
王艳海, 王江峰, 李学春等. 高功率激光装置前端系统激光脉冲的时间整形及修正技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 477~481
- 15 Ma Xiaohui, Wan Chunming, Shi Quanlin *et al.*. Fiber-coupled high power laser diode by polarization multiplexing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1343~1346
马晓辉, 万春明, 史全林等. 基于偏振复用技术的激光二极管光纤耦合方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1343~1346
- 16 Gao Xin, Bo Baohue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1472~1475
高欣, 薄报学, 张晶等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1472~1475
- 17 Wang Jun, Bai Yiming, Chong Feng *et al.*. High power laser diode array with 60% electro-optical efficiency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1323~1327
王俊, 白一鸣, 崇锋等. 60%电光效率的高功率激光二极管阵列[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1323~1327