

高压超大电流光电导开关及其击穿特性研究^{*}

施 卫^{1)†} 田立强¹⁾ 王馨梅¹⁾ 徐 鸣¹⁾ 马德明¹⁾ 周良骥²⁾ 刘宏伟²⁾ 谢卫平²⁾

1) 西安理工大学理学院应用物理系, 西安 710048)

2) 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2008 年 2 月 23 日收到, 2008 年 8 月 5 日收到修改稿)

研制了耐压达 32 kV, 通态峰值电流达 3.7 kA 的高压超大电流半绝缘 GaAs 光电导开关. 分析了光电导开关在强场下的击穿机理. 指出对于间接能带间隙光导材料(如 Si)制作的光电导开关, 开关的击穿电压主要由陷阱填充限制电导模型决定. 而对于直接能带间隙光导材料(如 GaAs, InP 等)制作的光电导开关, 开关击穿主要是由开关体负阻效应在开关阳极产生的空间电荷累积所导致的开关阳极电场剧增引起的. 基于转移电子效应对 GaAs 光电导开关击穿电压进行了理论计算, 计算结果与实验相一致.

关键词: 光电导开关, 击穿, 转移电子效应, 陷阱填充

PACC: 7220H, 7240, 7750, 8240M

1. 引 言

光电导开关(photoconductive semiconductor switches, PCSS's)是利用超短脉冲激光器与光电导材料(如 GaAs, InP 等)相结合形成的一类新型半导体光电子器件. 与传统的开关相比, PCSS's 具有开关速度快(亚纳秒量级)、触发无晃动、寄生电感电容小、结构简单紧凑等特点, 特别是耐高压及其大功率容量使其在超高速电子学、大功率脉冲产生与整形(大功率亚纳秒脉冲源、超宽带射频发生器)及 THz 辐射等领域具有广泛的应用^[1-8].

近年来, 随着雷达、通信、激光核聚变等技术领域的迅速发展, 对高压大功率发生系统及其开关技术提出更高的要求. 于是提高光电导开关的耐压性能及通流能力成为人们追求的重要技术指标. 在国外, 耐压达几十伏到上兆伏、通流从几十安至数千安的 PCSS's 已有报道^[9-13]. 在高压 PCSS's 研制中, 通常选用的光导材料有 Si, GaAs 等, 由于 GaAs 材料具有暗态电阻高、光电性能好等特点, 而成为制作开关的首选材料^[14, 15]. 然而在偏置电场远小于开关本征击穿场强的条件下, GaAs 光电导开关就会击穿, 这使得开关的实际应用受到很大限制. 到目前为止, 人

们对开关的击穿机理还不清楚^[16, 17], 大功率 PCSS's 走向实用化的最大障碍仍是其输出电脉冲稳定性和开关寿命. 那么, 在强电场触发条件下, GaAs 芯片可以承受的击穿强度究竟有多大, 如果发生击穿, 击穿的物理机理又是什么? 这些问题无论对开关的研制还是应用都是亟待解决的.

本文报道了耐压达 32 kV, 峰值电流达 3.7 kA 的半绝缘 GaAs PCSS. 依据开关的材料特性及在考虑 GaAs 器件高场下转移电子效应的基础上, 结合开关耐压强度测试实验, 分析了开关击穿的物理机理.

2. 实 验

实验采用开关为横向 PCSS, 开关结构示意图见图 1. 开关芯片材料选用半绝缘 GaAs 材料, 材料暗态电阻率 $\rho \geq 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 电子迁移率 $\mu > 5000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 开关芯片厚度为 0.6 mm、宽为 0.8 cm、长为 2.0 cm. 开关电极为 Au/Ge/Ni 合金电极, 通过电子束蒸发工艺, 经退火处理与开关芯片形成欧姆接触. 电极尺寸为 8 mm × 3 mm, 电极间隙为 14 mm.

图 2 为光导开关的高压、大电流测试电路, 开关与两个串联的充电电容相连接, 两电容器分别经水电阻(1 M Ω)与直流高压源(+50 ~ -50 kV)相接. 在

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 50837005, J0876026)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB310406)和西安理工大学优秀博士研究生基金(批准号: 207-210006)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

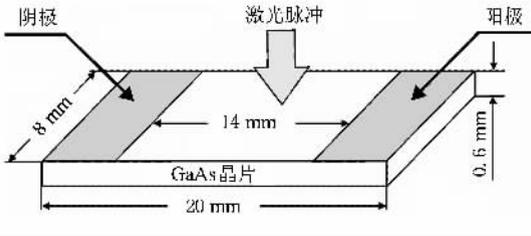


图 1 横向 PCSS 结构示意图

电容和开关回路中绕有罗果夫斯基线圈用以测量回路中可能大于 1000 A 的电流。线圈最小响应时间为 1 ns，灵敏度为 0.1 V/A。实验所用示波器为 TDS5054。测流线圈经带宽为 1 GHz 40 dB 的衰减器与示波器相连接。为了防止开关的沿面击穿，开关表面涂覆 Si₃N₄ 绝缘透明介质薄膜，并置于 3 atm (1 atm = 101.325 Pa) 的 SF₆ 气体中。触发光源为 Nd:YAG 调 Q 激光器，激光脉冲宽度为 15 ns，输出光脉冲波长为 1064 nm。

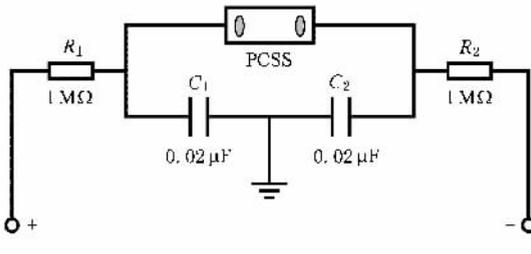


图 2 高压大电流 PCSS 测试电路

在开关的通流能力测试中，偏置电压从 7 kV 开始，每升高 2 kV 触发一次开关，当开关偏置电压增至 28 kV、触发光能为 7.9 mJ 时，开关输出峰值电流达 3.7 kA、脉宽约 100 ns 的电脉冲。图 3 (a)–(c) 分别为偏置电压为 14、20 和 28 kV，对应触发光能分别为 7.2、7.4 和 7.9 mJ 时开关的电流输出波形，开关峰值电流分别高于 1.2 和 3 kA。

在开关耐压能力测试中，为防止超大电流对开关的损伤，将光电导开关与 21 Ω 的限流电阻相串联。开关电压从 12 kV 开始，每增加 2 kV 触发一次开关，当开关电压增至 34 kV 时，开关在无触发的条件下突然击穿，在开关的阳极留下明显的击穿痕迹。图 4 为击穿前后，开关的实物照片。开关的最高耐压为 32 kV，在触发光能为 28 mJ 的条件下开关输出峰值电流达 900 A、脉冲宽度约为 270 ns 的电脉冲，图 5 为开关电流输出波形。

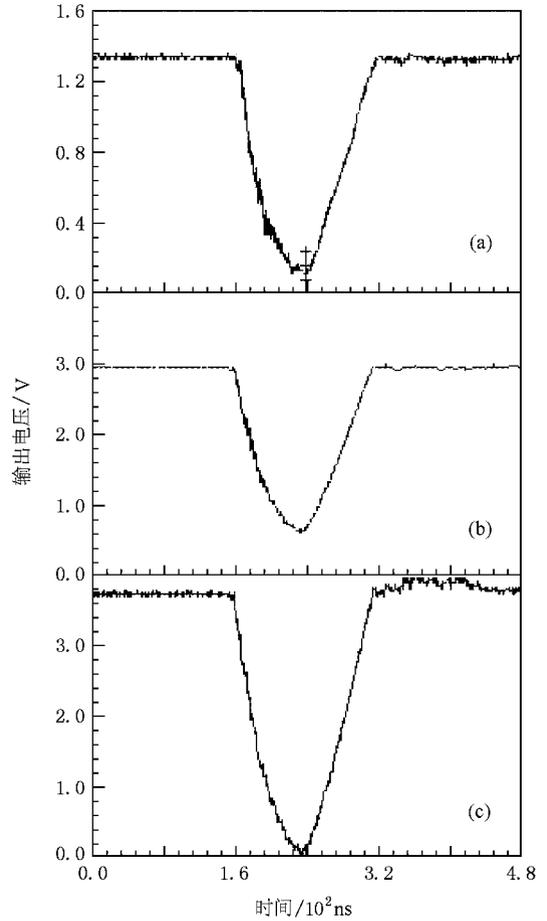


图 3 PCSS 电流输出波形 (1 kA/V) 偏置电压 (a) 为 14 eV (b) 为 20 kV (c) 为 28 kV

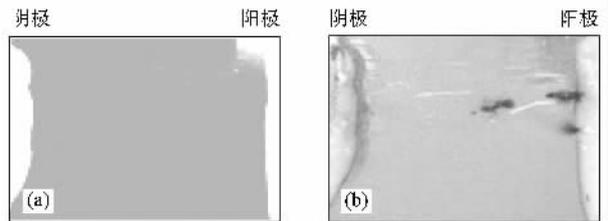


图 4 PCSS 击穿样品 (a) 击穿前 (b) 击穿后

3. 结果分析

虽然 GaAs 材料的本征击穿场强高达 250 kV，然而在实际应用中，开关在远小于本征击穿场强的条件下就已击穿^[18]。可见对 GaAs PCSS 应存在特殊的击穿机制。对于非掺杂半绝缘 (SI) 液封直拉 (LEC) 原生 GaAs 单晶，其半绝缘性质是由深施主 EL2 和以 C_{As} 为主的剩余浅受主的补偿作用所决定的^[19, 20]。

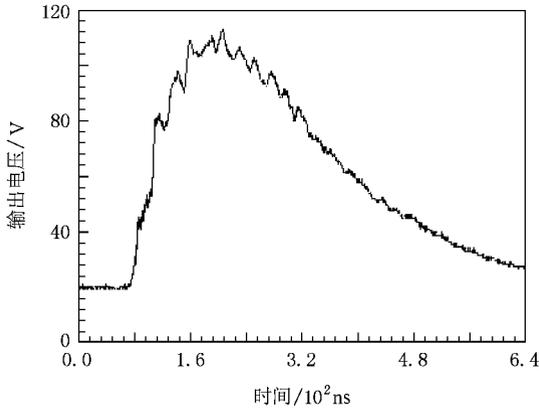


图5 偏置电压为 32 kV、触发光能为 28 mJ 时,PCSS 输出电流波形(10 A/V)

SI-GaAs 的杂质能带结构如图 6 所示,图中 N_i^+ 表示电离的 EL2 深能级缺陷浓度, N_a 为浅受主浓度,在数值上 N_i^+ 应等于 N_a 。

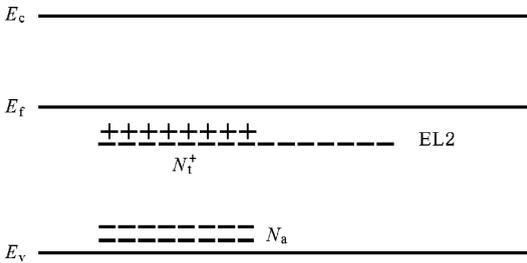


图6 SI-GaAs 材料中深施主 EL2 的能带结构 电子陷阱的电离浓度 N_i^+ 等于浅受主浓度 N_a

当开关的偏置电压较小时,开关体导电表现为欧姆特性.由于开关器件长度足够长,随着偏置电压的增大,开关体内将会发生陷阱填充限制电流及载流子漂移速度饱和等效效应.陷阱填充限制电流效应的阈值电压可以表示为^[21]

$$V_{TFL} = \frac{qN_i^+ L^2}{2\epsilon} \quad (1)$$

式中 q 表示单个载流子所带电量, ϵ 表示材料的介电常数, L 为器件长度.

在欧姆导电机制中,开关体内的电场应处处均匀,为一常量,其大小由偏置电压 V_A 与器件长度 L 的比值决定.当偏置电压高于阈值 V_{TFL} 时,则开关导电特性表现为陷阱填充限制和空间电荷限制电导模式,在开关体内形成由电子构成的空间电荷,这时开关体内电场不再均匀,而是从阴极向阳极线性增大,对于用不具有转移电子效应材料制作的 PCSS,如

Si,当开关阳极电场增至材料的本征击穿场强时,开关将被击穿,这样开关的击穿电压可表示为^[22]

$$V_b = \frac{E_b L}{2} \quad (2)$$

式中 E_b 表示开关的本征击穿场强.在高功率开关中,由于陷阱填充与空间电荷限制电导会导致大的暗态电流,因此陷阱浓度将尽可能大地使 V_{TFL} 增高^[23].

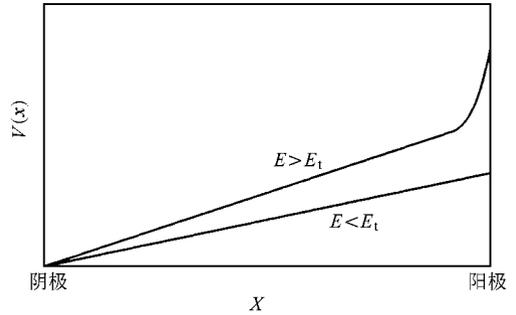


图7 在直流偏置下,SI-GaAs PCSS 芯片内电压分布.当平均电场低于 E_t 时,开关体内电场均匀分布;当平均电场高于 E_t 时,在开关阳极形成高场区

对于具有转移电子效应的半导体材料,如 GaAs,InP 等,在高场下,器件体内的电场分布却大不相同.当开关偏置电场低于 Gunn 阈值电场 E_t 时,开关体内电场是均匀的.随着偏置电压的增高,当阳极附近电场高于阈值 E_t 时,由于负阻效应,将使进入该区域的电子漂移速度降低.而在开关体内阳极附近区外,因电场较小,载流子仍保持较高的漂移速度,因此为了维持开关体内电流的连续性,阳极附近自由载流子浓度将会增加,形成高浓度的空间电荷积累层(Gunn 畴),自由电子浓度的增高,反过来会使该区域的电子陷阱得到进一步的填充,于是在开关阳极附近形成负空间电荷的积累区.若积累区外电场强度保持恒定(约为 Gunn 阈值电场),那么,在阳极附近会形成一高电场区,如图 7 所示.由于在阳极附近电场的急剧增强,使开关的击穿电压显著小于由(2)式给出的计算值.在这种情况下,阳极附近局部电场强度主要由电子陷阱浓度决定.对于 EL2 掺杂的 GaAs,电子陷阱浓度应等于浅受主浓度 N_a .这时,阳极附近高场区的峰值电场应等于高场畴内的最大电场,其量值可表示为^[24]

$$E_m = [2qN_a(V - E_t L)]^{1/2} \cdot (\epsilon)^{1/2} \quad (3)$$

式中 V 为开关的偏置电压.

当高场区最大电场 E_m 增大到材料的本征击穿

电场 E_b (约 250 ~ 300 kV/cm) 时, 开关将被击穿, 由 (3) 式可推出开关的击穿电压表示式为

$$V_b = \epsilon E_b^2 \cdot (2qN_a)^{-1} + E_t L. \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 如果陷阱浓度较高时 (大于 10^{14} cm^{-3}) 开关的击穿电压主要由耿氏阈值电场与开关电极间隙的乘积决定. 而当陷阱浓度较低时, 开关的击穿电压主要由陷阱浓度决定.

若选取开关的本征击穿电场 $E_b = 280 \text{ kV/cm}$, GaAs 材料的介电常数 $\epsilon = 1.16 \times 10^{-10} \text{ SI}$, 单个载流子带电量为 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 浅受主浓度 $N_a = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 耿氏阈值电场 $E_t = 4.2 \text{ kV/cm}^{[25]}$, 实验所用开关间隙 $L = 14 \text{ mm}$, 则由 (4) 式可算得开关的击穿电压 $V_b = 34.3 \text{ kV}$, 该数据与实验结果很好地符合.

此外, 在光电导开关工作过程中, 开关暗态漏电流产生的焦耳热效应也是导致开关击穿的一个重要机制. 在直流偏置条件下尤为明显. 暗态漏电流的降低可通过在光导材料制备过程中调节深能级陷阱浓度提高开关暗态电阻实现, 或通过开关材料与良好散热装置相连接而降低热效应对开关耐压性能的影响. 关于开关的热击穿理论在文献 [26] 中已有讨论,

在这里不再作叙述.

4. 结 论

进行了半绝缘 GaAs 光电导开关的耐压性能测试和通流能力测试, 在触发光能为 28 mJ 条件下, 获得了耐压达 32 kV、峰值电流为 900 A 的半绝缘 GaAs 光电导开关; 在偏置电压为 28 kV、触发光能为 7.9 mJ 条件下, 获得峰值电流达 3.7 kA 的半绝缘 GaAs 光电导开关.

对光电导开关的击穿机制进行了分析, 分析表明对于间接能带间隙半导体材料制作的 PCSS's, 由于开关不具有转移电子效应, 开关的击穿主要由陷阱填充限制电导模型决定, 理想状态下开关击穿电压可达到本征击穿电压的一半; 而对直接能带间隙光导材料制作的 PCSS's, 转移电子效应是引起开关击穿的主要机制, 开关的击穿电压主要由陷阱浓度及耿氏阈值电场与器件长度乘积决定. 在此分析的基础上, 依据实验条件和 Gunn 效应电子学相关理论, 对开关的击穿电压进行了计算, 理论计算与实验结果相一致.

[1] 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]

[2] Keil U D, Gerritsen H J, Haverkort J E M, Wolter J H 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 1629

[3] Shi W, Jia W L, Ji W L, Liu K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6335 [in Chinese] 施卫、贾婉丽、纪卫莉、刘 2007 物理学报 **56** 6335]

[4] Nahata A, Yardley J T, Heinz T F 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2524

[5] Islam N E, Schamiloglu E, Schoenberg J S H, Joshi R P 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 1512

[6] Jia W L, Ji W L, Shi W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2042 [in Chinese] 贾婉丽、纪卫莉、施卫 2007 物理学报 **56** 2042]

[7] Sun H Q, Zhao G Z, Zhang C L, Yang G Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 790 [in Chinese] 孙红起、赵国忠、张存林、杨国栋 2008 物理学报 **57** 790]

[8] Sun B, Yao J Q, Wang Z, Wang P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1390 [in Chinese] 孙博、姚建铨、王卓、王鹏 2007 物理学报 **56** 1390]

[9] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, Hjalmarson H P, Plut T A, Helgson W D, O'Malley M W, Ruebush M H, Brown D J 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 124

[10] Mourou G, Knox W 1979 *Appl. Phys. Lett.* **35** 492

[11] Pocha M D, Druce R L 1990 *IEEE Trans. Electron Dev.* **37** 2486

[12] Nunnally W C, Hammand R B 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 980

[13] Zutavern F J, Loubriel G M, Buttram M T, O'Malley M W, Helgson W D, McLaughlin D L 1991 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* **1** 377

[14] Liu X H, Shi B, Jia G, Chen Z G, Ren C, Zhang Y H, Cao K, Zhao J X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 101109

[15] Yang Y P, Shi Y L, Yan W, Xu X L, Ma S H, Wang L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4079 [in Chinese] 杨玉平、施宇蕾、严伟、徐新龙、马士华、汪力 2005 物理学报 **54** 4079]

[16] Islam N E, Schamiloglu E, Fleddermann 1998 *Appl. Phys. Lett.* **13** 1988

[17] Loubriel G M, Helgson W D, McLaughlin D L, O'Malley M W, Zutavern F J, Rosen A, Stabile P J 1991 *IEEE Trans. Electron Devices* **38** 692

[18] Shi W, Zhao W, Zhang X B, Li E L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 867 [in Chinese] 施卫、赵卫、张显斌、李恩玲 2002 物理学报 **51** 867]

[19] Kiyama M, Tatsumi M, Yamada M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 012102

[20] Au H L, Ling C C, Panda B K, Lee T C, Beling C D, Fung S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2732

- [21] Lampert M A , Mark P 1970 *Current Injection in Solids* (New York : Academic) p91
- [22] Ghandhi S K 1977 *Semiconductor Power Devices* (New York : Wiley) p12
- [23] Kao K C , Hwang W 1991 *Electrical Transport in Solids* (Beijing : Science Press) p183
- [24] Niladiri R , Mantena R , Wright L M 1969 *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques* **17** 363
- [25] Gunn J B 1964 *IBM J. Res. Dev.* **8** 141
- [26] Shi W , Tian L Q 2004 *Chin. J. Semicond.* **25** 691 (in Chinese)
- [施 卫、田立强 2004 半导体学报 **25** 691]

A high-voltage and high-current photoconductive semiconductor switch and its breakdown characteristics *

Shi Wei^{1)†} Tian Li-Qiang¹⁾ Wang Xin-Mei¹⁾ Xu Ming¹⁾ Ma De-Ming¹⁾ Zhou Liang-Ji²⁾
Liu Hong-Wei²⁾ Xie Wei-Ping²⁾

¹ *Department of Physics , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 , China)*

² *Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)*

(Received 23 February 2008 ; revised manuscript received 5 August 2008)

Abstract

Semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) with withstand voltage of 32 kV and peak current of 3.7 kA has been developed. The breakdown mechanism of the PCSS is analyzed. It is shown that the breakdown of PCSS fabricated from indirect band-gap semiconductors is determined mainly by limited conduction of trap filling , but for PCSS 's fabricated from materials that exhibit the transferred-electron effect , such as GaAs , breakdown of the PCSS is caused mainly by the negative-resistance-induced electric field enhancement at the anode boundary. Based on the Gunn effect electronics , the breakdown voltage of the semi-insulating GaAs PCSS is calculated , and the calculated results agree with the experimental results.

Keywords : photoconducting switch , breakdown , transferred-electron effect , trap filling

PACC : 7220H , 7240 , 7750 , 8240M

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50837005 , 10876026) , the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant No. 2007CB310406) , and the Research Fund for Outstanding Doctors of Xi 'an University of Technology , China (Grant No. 207-210006).

† E-mail : swshi @mail. xaut. edu. cn