

文章编号:1006-9941(2019)06-0465-08

基于二极管电爆炸的单触发开关导通机理

徐聪¹,胡博²,朱朋¹,叶迎华¹,沈瑞琪¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 陆军炮兵防空兵学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 采用磁控溅射、紫外光刻、化学气相沉积等微机电加工技术,制备了基于Schottky结二极管和p-n结二极管的两种单触发开关,分析了无负载时它们的放电特性,两种开关在0.22 $\mu\text{F}/1500\text{ V}$ 、0.22 $\mu\text{F}/1200\text{ V}$ 下达至2000 A左右的峰值电流。研究了触发电容容值、触发电压、主电压、绝缘层厚度和双二极管并联结构对导通性能的影响,发现随着触发电容容值的增加,最小触发电压逐渐降低;减小绝缘层厚度、提高触发电压和主电压,均有利于峰值电流的升高;双二极管并联作为触发元件时,峰值电流比基于单个二极管的单触发开关更高,上升时间更短。根据单触发开关的放电特性曲线,将其作用过程划分为二极管电爆炸、绝缘介质层击穿和脉冲大电流上升三个阶段,阐明了各阶段的作用机制,建立了相应的电阻模型,结果表明单触发开关的电阻可以视为常数,并且阻值在毫欧级。

关键词: 高压开关;单次触发;二极管电爆炸;导通机理;电阻模型;微机电系统加工技术

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018331

1 引言

高压开关是脉冲功率技术中的关键器件之一^[1],其导通性能直接决定着脉冲电流的幅值和上升时间。当电容放电回路中脉冲电流峰值较低或上升时间较长时,便难以在负载上形成 10^6 W 以上的脉冲功率。目前常见的高压开关有火花隙开关^[2-5]、半导体开关^[6]、机械开关、油浸开关、电爆炸导体开关^[7]等,被广泛应用于核物理技术、等离子体技术、电磁脉冲模拟、爆炸箔起爆技术^[8]等领域^[9]。介电击穿式等离子体开关因具有良好的导通性能、较低的导通电阻,受到了国内外研究人员的广泛关注^[10]。

2009年,美国T. A. Baginski等^[11]设计制备了一种基于绝缘介质击穿原理的单触发开关,通过肖特基二极管发生电爆炸,击穿绝缘介质层聚氯代对二甲苯

(Parylene C, PC),从而使上、下电极导通,电性能测试结果表明在0.17 $\mu\text{F}/800\text{ V}$ 的条件下,峰值电流达到了1236 A,上升时间约为100 ns。2010年,周镇威等^[12]制备了以聚酰亚胺为绝缘介质层的单触发开关,在0.47 $\mu\text{F}/1400\text{ V}$ 的条件下获得了2700 A的峰值电流,上升时间约为370 ns。2015年,胡博等^[13]研究了单触发开关在1000~1600 V之间的放电性能,包括峰值电流、上升时间和延迟时间等,并且进行了初步的理论分析。2017年,Xu C^[14]将单触发开关与爆炸箔起爆器一体化集成,极大地缩短了放电回路,降低了回路电阻、电感,提高了能量利用率,最后在0.22 $\mu\text{F}/1400\text{ V}$ 的发火条件下,成功起爆了六硝基芪(HNS)药柱。然而,针对单触发开关导通机理和电阻模型的研究一直比较薄弱,尚未形成成熟的理论及数学模型。本研究采用磁控溅射、紫外光刻、化学气相沉积等微机电加工技术(Micro Electro Mechanical System, MEMS),制备了基于Schottky结二极管和p-n结二极管的两种单触发开关。利用高压差分探头、Rogowski线圈测试了单触发开关的放电特性,研究了触发电容、触发电压、主电压、绝缘层厚度与双二极管并联结构对单触发开关导通性能的影响。根据单触发开关的放电特性曲线,阐明了整个导通过程中各阶段作用机制,建立了相

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2019-01-19

网络出版日期: 2019-04-01

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151486)

作者简介: 徐聪(1993-),男,博士研究生,主要从事微芯片爆炸箔起爆技术研究。e-mail: congxu@njust.edu.cn

通信联系人: 朱朋(1978-),男,博导,副研究员,主要从事先进火工品技术研究。e-mail: zhupeng@njust.edu.cn

引用本文: 徐聪,胡博,朱朋,等. 基于二极管电爆炸的单触发开关导通机理[J]. 含能材料, 2019, 27(6):465-472.

XU Cong, HU Bo, ZHU Peng, et al. Conduction Mechanism of the Single Shot Switch Based on Electro-explosion of Diode[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(6):465-472.

应的电阻模型。

2 设计与制备

单触发开关的基本结构包括下电极、绝缘层、上电极和触发元件二极管,其作用原理如图 1 所示^[11]:触发前将触发回路中的电容 C_1 和主回路中的电容 C_2 充到相应的电压;向绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 的栅极输入一个 5~15 V 的脉冲信号,IGBT 开关导通;当二极管两端的电压大于其反向击穿电压时,二极管被反向击穿,结区发生汽化、等离子化,形成冲击波;在机械冲击的作用下,上、下电极之间的绝缘介质层被击穿;高压以电弧的形式穿过上、下电极,单触发开关导通。

单触发开关的制备涉及了磁控溅射、紫外光刻、化学气相沉积等多项 MEMS 技术,其工艺流程如图 2 所示。以陶瓷片为基底,采用磁控溅射技术沉积 Cu 膜,利用紫外光刻技术刻蚀出下电极和焊盘。通过化学气相沉积技术,在下电极上沉积 PC 作为绝缘层。采用磁

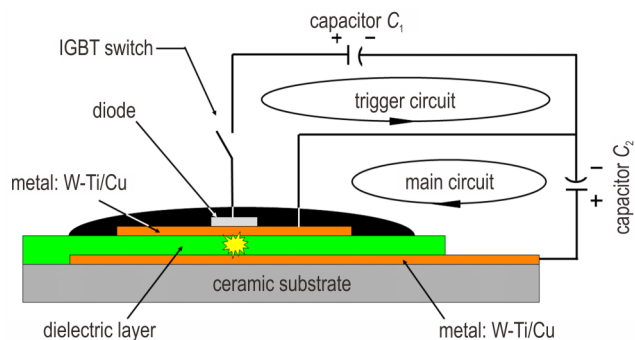


图 1 单触发开关结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the single shot switch

控溅射技术和紫外光刻技术,制备上电极。以 SU-8 胶作为结构材料,通过紫外光刻技术制备约束槽。采用机械切割,将陶瓷基片上的单触发开关阵列分解成独立单元。将二极管阳极朝下,粘接在上电极之上,其阴极以铝丝键合引出,压焊到焊盘 1 上,作为触发极;扁平铜带一端粘接在上电极之上,另一端压焊在焊盘 2 上,作为共地极。最后将绝缘电子灌封胶填入约束槽,在 60 °C 下加热 2 h 固化。制得的单触发开关样品如图 3 所示。

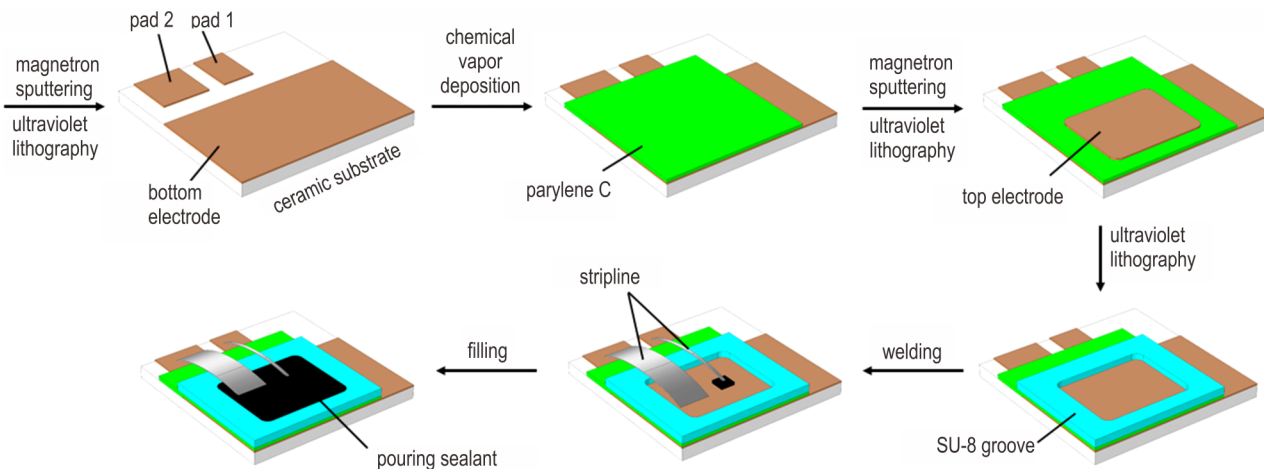


图 2 单触发开关的工艺流程图

Fig.2 Fabrication process of the single shot switch

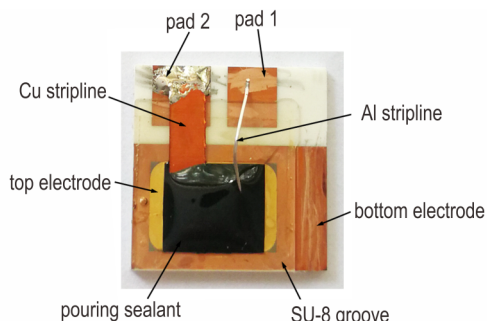


图 3 单触发开关样品图

Fig.3 Photograph of the single shot switch

由于 Schottky 二极管反向击穿电压较低,一般只有几十伏,因而在极端环境下容易失效,难以满足 500 V 安全性要求^[15]。此外, Schottky 二极管的触发电压虽然较低,然而所需能量较高,因而触发电容一般为电解质电容,体积较大,不利于器件的小型化。由于整流二极管具有较高的反向击穿电压,并且 p-n 结更易于汽化,因此本研究同时选取一种反向击穿电压为 600 V 的 p-n 结二极管,作为触发元件。

3 电气性能测试

采用高压差分探头 (Tektronix THDP 0200) 和 Rogowski 线圈 (CWT Mini-HF 60), 分别测量电压和电流信号, 定义 U_1 为二极管两端的压降, U_2 为电容 C_2 两端的压降; I_1 和 I_2 分别是触发回路和主回路中的电流。

3.1 无负载时单触发开关的放电特性

当主回路中只包含电容 C_2 和单触发开关时, 即为无负载状态。当触发电容 C_1 (2.2 mF) 和主电容 C_2 (0.22 μ F) 分别加压 90 V、1500 V 时, 基于 Schottky 结二极管的单触发开关 (PC 厚度 25 μ m) 的放电曲线如图 4 所示。当 IGBT 导通后, 在电容 C_1 两端电压的作用下 Schottky 势垒被打破, 并进一步引发电子雪崩; 随着能量不断注入, Schottky 结发生汽化、等离子体化, 该过程历时 981 ns; 随后电容 C_2 两端的电压从 1500 V 开始下降, 经过 14 ns, 绝缘层 PC 被击穿; 主回路中脉冲大电流 I_2 开始上升, 在 275 ns 内达到了峰值。

根据美军标 MIL-DTL-23659D 的要求, 短路放电电流曲线应至少包含 5 个等间隔减幅的振荡波形, 由此可以计算出放电回路的等效电感、电阻^[16-17]:

$$L = \frac{\bar{T}^2}{4\pi^2 C} \quad (1)$$

$$R = \frac{2L}{\bar{T}} \ln \xi \quad (2)$$

式中:

表 1 实验与文献[11]中的单触发开关性能对比

Table 1 Comparison of the electrical performance between results from the reference and our experiment

	capacitor / μ F	voltage / V	current peak / A	risetime / ns	resistance / m Ω	inductance / nH
ref.[11]	0.17	800	1236	100	400	16.6
single shot switch based on Schottky diode	0.22	1500	2279	275	200	100

当触发电容 C_1 (0.91 μ F) 和主电容 C_2 (0.22 μ F) 分别加压 700、1200 V 时, 得到基于 p-n 结二极管的单触发开关 (PC 厚度 25 μ m) 的放电曲线如图 5 所示。对比图 4、图 5 可以看出, 基于 Schottky 结二极管和基于 p-n 结二极管的两种单触发开关的导通具有相似性。当 IGBT 开关导通以后, 历时 834 ns, p-n 结发生电爆炸; 随后主电压 U_2 迅速下降, 历时 14 ns, 绝缘层 PC 被击穿; 脉冲大电流 I_2 开始上升, 在 159 ns 内达到了 2068 A 的峰值电流。

触发电容所储存的能量 E_1 可以通过容值 C_1 和充电

$$\bar{T} = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{n}, \xi = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{n}, \lambda_j = \frac{I_j}{I_{j+1}}$$

式中, L 为放电回路等效电感, H ; R 为放电回路等效电阻, Ω ; \bar{T} 为平均周期, s ; C 为主电容 C_2 的容值, F ; ξ 为电流衰减平均系数; I_j 和 I_{j+1} 分别是正向振荡电流峰值, A 。

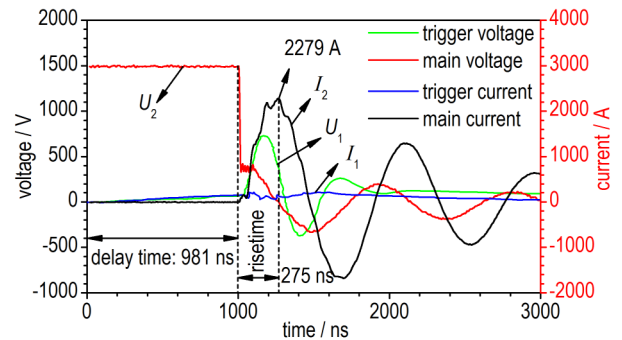


图 4 基于 Schottky 结二极管的单触发开关经典放电曲线
Fig. 4 Typical discharge curves of the single shot switch based on Schottky diode

根据公式 (1) 和 (2), 得到放电回路的等效电感为 100 nH, 等效电阻为 200 m Ω 。表 1 为文献 [11] 及本研究的实验结果。由表 1 可以看出, 基于 Schottky 结二极管的单触发开关在同等发火能量下, 达到的峰值电流比文献 [11] 中的峰值电流低, 这是由于放电回路电感较大, 致使储存在电容中的能量部分转化为磁能。电感较大, 一方面是因为实验用电容 C_2 为薄膜电容, 其脚线较细长; 另一方面, 在测试时为保证 Rogowski 线圈能穿过回路, 放电回路被加长了一段。

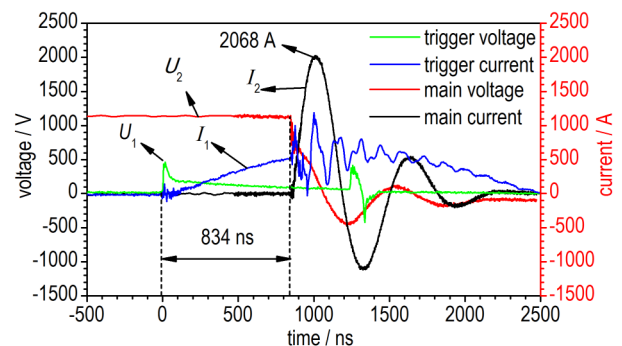


图 5 基于 p-n 结二极管的单触发开关经典放电曲线
Fig. 5 Typical discharge curves of single shot switch based on p-n diode

电压 U 计算得到:

$$E_t = \frac{1}{2} C_1 U^2 \quad (3)$$

经过大量试验, 结果表明: Schottky 结二极管的最小触发条件为 2.2 mF/40 V, $E_{t,1}=1.76$ J; p-n 结二极管的最小触发条件为 0.91 μ F / 600 V, $E_{t,2}=0.16$ J。显然, 后者的触发能量更低。

3.2 触发电容容值对触发电压的影响

文献[11]给出的基于 Schottky 结二极管的单触发开关的触发条件为 2 mF/50 V, 市面上容值在毫法级的电容只有电解质电容, 其体积一般在数十至数百立方厘米。为进一步减轻电路负担、降低触发条件, 采用容值为 2.2, 1, 0.68, 0.47, 0.2, 0.1 mF 的电解质电容分别作为触发电容, 试验结果如图 6 所示。最低触发电压定义为: Schottky 二极管被反向击穿、电爆以后, 单触发开关三次均不能导通的最大电压。根据图 6 可知, 随着触发电容容值减小, 最小触发电压急剧升高, 呈现出反比关系, 这说明 Schottky 结的电爆炸与能量有关。当触发电容 C_1 提供的能量不足以使 Schottky 结发生电爆炸, 或电爆炸太弱, 产生的冲击难以击穿绝缘层 PC^[18], 开关都不会导通。

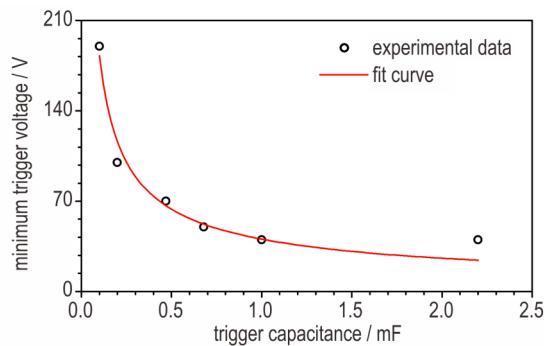


图 6 最小触发电压与触发电容容值之间的关系

Fig. 6 The relationship between minimum trigger voltage and the trigger capacitance

通过非线性数据拟合, 得到最小触发电压与触发电容 C_1 容值之间的关系为:

$$U_{t,\min} = \frac{0.44}{C_1^{0.65}} \quad (4)$$

从图 6 可以看出, 触发电容容值为 2.2 mF 时最小触发电压与拟合曲线相差较大, 这是因为本研究选用的 Schottky 二极管的反向击穿电压为 40 V, 低于此电压则二极管不能被反向击穿。

3.3 主电压、触发电压与绝缘层厚度对导通性能的影响

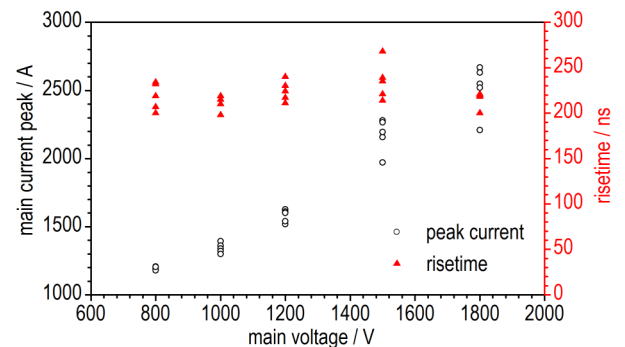
图 7 给出了基于 Schottky 结二极管的单触发开关

的峰值电流随主电压、触发电压与绝缘层 PC 厚度变化的关系, 每个数据点均试验 5 次。由图 7a 可知, 随着主电压 U_2 的升高, 峰值电流呈线性增加的趋势, 说明单触发开关的导通电阻为常数。由于主回路只包含单触发开关、脉冲功率电容 C_2 以及连接线, 因而可以简化为 RLC 振荡电路。根据 Kirchhoff 定律, RLC 振荡电路的回路方程为^[19]:

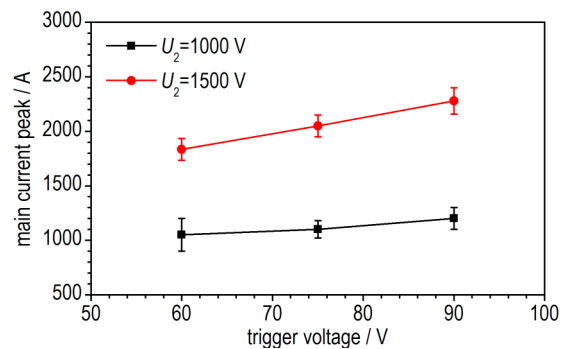
$$\frac{di(t)}{dt}L + R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = 0 \quad (5)$$

则电流表达式为:

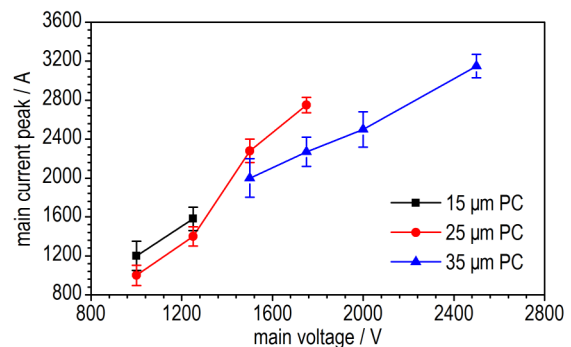
$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} \sin \omega t \cdot e^{-\beta t} \quad (6)$$



a. under different main voltages



b. under different trigger voltages



c. under three kinds of PC thicknesses

图 7 主电压、触发电压与绝缘层厚度对单触发开关峰值电流的影响

Fig. 7 Influence of the main voltage, trigger voltage and PC thickness on the peak current of the single shot switch

式中

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \beta = \frac{R}{2L}$$

式中, ω, β 分别称为阻尼振荡角频率、衰减因子。电流放电曲线的周期:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (7)$$

当放电回路电阻较小时, (7) 式可简化为:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC}}} \quad (8)$$

在单触发开关电阻、电感和放电回路参数固定的情况下, 衰减因子、阻尼振荡角频率和放电周期均不会变, 因此上升时间几乎保持不变。由图 7b 可知, 当主电压 U_2 为 1000 V 和 1500 V 时, 随着触发电压的升高, 流经主回路的电流 I_2 的峰值会随之升高, 说明触发能量越高, Schottky 结电爆炸后等离子化程度越高, 产生的等离子体数量也越多, 当开关导通时等离子体在高电场作用下迁移、重排, 从而使主回路中的电流 I_2 更大。由图 7c 可以看出, 在同一主电压 U_2 下随着绝缘层 PC 厚度增大, 流经单触发开关的电流 I_2 越小, 说明单触发开关的电阻随着绝缘层厚度增大而增大。

3.4 双二极管并联结构对导通性能的影响

当以两个 Schottky 二极管作为触发元件时, 所采集到的单触发开关(PC 厚度 35 μm) 的电流曲线如图 8 所示。为使两个 Schottky 二极管发生同等程度电爆炸, 采用两个低压电容 C_1 分别放电。对比基于单个 Schottky 二极管的单触发开关的电流曲线, 在 0.22 $\mu\text{F}/1500$ V 的条件下电流峰值达到了 2218 A, 比前者高出 300 A 左右, 并且电流上升陡度大、放电周期短、电流衰减缓慢, 说明两个 Schottky 二极管同时发生电爆炸, 在单触发开关导通时形成了两条等离子体通道, 此时单触发开关的电阻比基于单 Schottky 二极管的单触发开关的电阻更小。采用 Mathematica 软件对试验数据进行仿真, 假定开关电阻为常数, 当基于单、双 Schottky 二极管的单触发开关的电阻分别为 200、90 m Ω 时, 电流曲线与拟合曲线基本重合, 说明单触发开关的电阻可以视为常数, 并且阻值在毫欧级, 也说明采用多个二极管并联时, 单触发开关的电阻可以按照并联电阻计算公式进行估算。

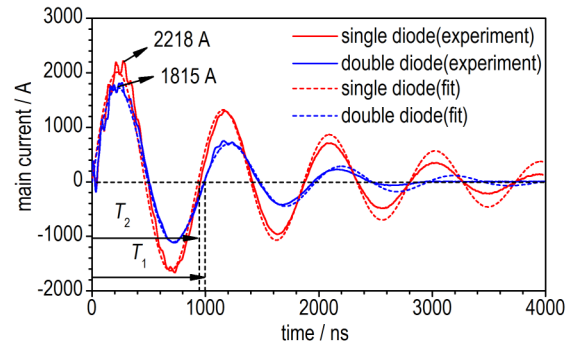


图 8 基于单、双 Schottky 二极管的单触发开关的电流曲线与仿真曲线的比较

Fig. 8 Comparison between the experimental curves and fit curves of the single shot switches based on the single Schottky diode and double Schottky diodes

4 导通机理与电阻模型

4.1 二极管电爆炸阶段

二极管电爆炸阶段又可以分为电子雪崩、Schottky 结或 p-n 结的汽化以及等离子化。当二极管两端加载的电压大于二极管反向击穿电压时, 载流子在电场中被加速获得动能, 进一步使空间电荷区的晶格原子离子化, 产生更多的载流子, 因而耗尽层变得越来越宽, 直至结区被反向击穿, 其过程如图 9 所示。

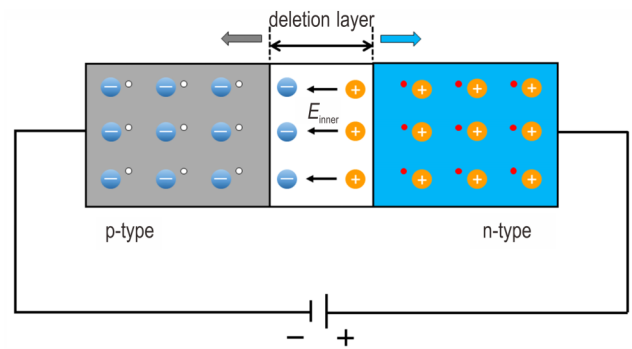


图 9 电子雪崩示意图

Fig. 9 Schematic diagram of electron avalanche

以 p-n 结为例: 当电流 I_1 穿过 p-n 结时, p-n 结吸收大量的热, 从而使结区发生相态变化。热量 Q 可以通过对穿过二极管的电压 U_1 和电流 I_1 进行积分计算而得^[20]:

$$Q = \int U_1 \cdot I_1 \cdot dt \quad (9)$$

p-n 结温度变化可以由式 (10)、(11) 计算而得:

$$\Delta T = \frac{Q}{C_v} \quad (10)$$

以及

$$C_v = \rho VC_p \quad (11)$$

式中, C_v 是硅的定容热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; C_p 是硅的定压热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ 是硅的密度, $kg \cdot m^{-3}$; V 是 p-n 结结区的体积, m^3 。当温度变化超过硅的沸点, p-n 结即发生汽化以及等离子化, 产生冲击波。

4.2 绝缘介质层击穿阶段

当二极管结区汽化、等离子化以后, 会产生数十兆帕的冲击波, 分别向上、下两侧传播, 如图 10 所示。向下传播的冲击波首先经过上电极, 当到达上电极与 PC 界面处, 发生透射与反射。当反射波达到上电极上表面时, 由于二极管电爆炸产生的等离子体密度较小, 因而反射波再次反射, 成为稀疏波。当稀疏波追赶上 PC 中的冲击波时, 就会使压力卸载, 因而压力持续时间 τ 可定义为:

$$\tau = \frac{2d_t}{D_t} \quad (12)$$

式中, d_t 为上电极的厚度, m ; D_t 为冲击波在上电极中的传播速度, $m \cdot s^{-1}$ 。由此可知, 绝缘层击穿仅需几十纳秒。

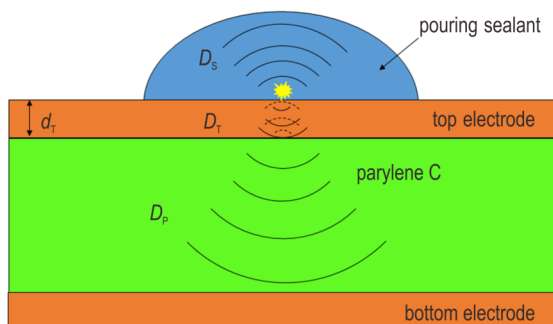


图 10 冲击波传播示意图

Fig.10 Schematic representation of shockwave propagation

当 PC 处于弹性状态时, 冲击波可以解耦为一维弹性纵波和一维弹性剪切波。当 PC 进入塑性状态以后, 由于压缩和剪切分量之间的耦合, 形成压剪塑性耦合波^[21]。假定塑性耦合波的影响可以忽略, 则冲击波可以简化为独立传播的压缩波。在弹性阶段 PC 中的应力-应变关系可以由式(7)描述:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta d}{d} \quad (13)$$

式中, E 为杨氏模量, MPa ; d 为 PC 厚度, μm 。经查知: PC 的杨氏模量为 $3200 MPa$, 屈服强度为 $69 MPa$ 。当二极管电爆炸产生的冲击压力达到 $69 MPa$ 时, PC 发生了塑性变形, 厚度由 $25 \mu m$ 压缩至 $24.46 \mu m$ 。由于 PC 局部被压缩形成“凹坑”, 上电极表面的电荷迅速

集中在“凹坑”处, 下电极表面的电荷则集中在“凹坑”的对应位置。在单触发开关导通以前, 上、下电极可视为电容的极板, 绝缘层可视为电容的介质层, 开关结构可简化为电容模型, 电容容值 C 为:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi kd} = \frac{q}{U} \quad (14)$$

式中, ε 是介电层的介电常数; S 是电容极板的正对面积, m^2 ; k 是静电力常量, $N \cdot m \cdot C^{-1}$; d 是电容极板的距离, m ; q 是电容器所带电荷量, C ; U 是电容器两极间的电压, V 。当绝缘层 PC 发生塑性变形以后, 假定“凹坑”截面积与二极管电爆炸结区面积相当, 在微米量级, 则此时上电极面积 S' 为原来的 $1/10^6$, 电容值 C' 也为原来的 $1/10^6$ 。在电荷量 Q 不变的情况下, U' 变为原来的 10^6 倍, PC 难以承受 $10^9 V$ 量级的高压, 因而发生电击穿。

4.3 脉冲大电流上升阶段

当绝缘介质层 PC 被击穿后, 单触发开关导通。对于等离子体通道, 利用修正的 Spitzer 公式^[22]可估算通道电导率 σ_c , 即:

$$\sigma_c = \frac{3.1 \times 10^{-2} T_e^{1.5}}{\ln(1 + 2.2 \times 10^{14} T_e^{1.5} / n_e)} \quad (15)$$

式中, T_e 为等离子体电子温度, K ; n_e 为电子密度, m^{-3} 。电子温度 T_e 可通过双谱线测温法得到, 电子密度 n_e 可采用平行电极板法测定^[23]。通过估算等离子体通道长度 l 和半径 r , 即可计算等离子体通道的电阻 R_p :

$$R_p = \rho_p \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma_c \pi r^2} \quad (16)$$

式中, ρ_p 为等离子体通道的电阻率, $\Omega \cdot m$; S 为通道的横截面积, m^2 。

通过式(15)和(16)可以计算出等离子体通道的电阻, 实际上等离子体的电导率很高, 电阻 R_p 非常小, 在毫欧量级。由式(16)还可以看出, 随着绝缘层厚度的增加, 等离子体通道 l 变长, 电阻更大, 因而在同一主电压 U_2 下, 得到的峰值电流会略小, 这与图 7c 相吻合。对于基于双 Schottky 二极管的单触发开关而言, 在导通时通道的横截面积 S' 变为之前的 2 倍, 因而电阻也更小, 这与图 8 相吻合。

5 结论

(1) 基于 Schottky 结、p-n 结二极管的两种单触发开关分别在 $0.22 \mu F / 1500 V$ 、 $0.22 \mu F / 1200 V$ 下达到了 $2000 A$ 左右的峰值电流, 上升时间为 $200 \sim 300 ns$,

可以满足爆炸箔起爆器等脉冲功率器件的使用要求。前者的最小触发条件为 2.2 mF/40 V, 需要的触发能量较高, 但适宜于低压下工作; 后者的最小触发条件为 0.91 μ F/600 V, 需要的触发能量较低, 但是能够满足 500 V 安全性要求。

(2) 以基于 Schottky 结二极管的单触发开关为例, 随着触发电容容值的增加, 最小触发电压逐渐降低, 二者之间关系可以描述为 $C^{0.65} U_{t,\min} = 0.44$; 当主电压、触发电压升高和绝缘层厚度降低时, 放电回路中的峰值电流均增大; 当单触发开关导通时形成两个或多个等离子体通道, 峰值电流会更高。

(3) 根据单触发开关的作用特点, 将其作用过程划分为二极管电爆炸、绝缘介质击穿和脉冲大电流上升三个阶段, 并且详细阐明了各个阶段作用机制, 建立了相应的电阻模型, 结果表明单触发开关的电阻可以视为常数, 并且其阻值在毫欧级。

参考文献:

- [1] Chu K W, Scott G L. A comparison of high-voltage switches, SAND99-0154[R]. Sandia National Laboratories, 1999.
- [2] 曾庆轩, 李守殿, 袁士伟, 等. 爆炸箔起爆器用高压开关研究进展[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1): 202-205.
ZENG Qing-xuan, LI Shou-dian, YUAN Shi-wei, et al. Research progress of high-voltage switches in exploding foil initiators [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(1): 202-205.
- [3] Lv J, Zeng Q, Li M. Metal foil gap switch and its electrical properties[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 150-154.
- [4] 杨智, 朱朋, 徐聪, 等. 微芯片爆炸箔起爆器及其平面高压开关研究进展[J]. 含能材料, 2018, 27(2): 167-176.
YANG Zhi, ZHU Peng, XU Cong, et al. Review on micro chip exploding foil initiator and its planar high-voltage switch [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 27(2): 167-176.
- [5] 陈楷. 集成爆炸箔起爆器与平面三电极高压开关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
CHEN Kai. Research on the technique of micro chip exploding foil initiator and planar three electrodes high voltage switch [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [6] 覃新, 朱朋, 徐聪, 等. 基于 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性[J]. 含能材料, 2019, 27(5): 417-425.
QIN Xin, ZHU Peng, XU Cong, et al. Characterization of high-voltage capacitor discharge unit based on MOS controlled thyristor [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(5): 417-425.
- [7] 杜枢, 孙奇志, 刘伟. 圆盘型发生器驱动固体套筒内爆的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 77-82.
DU Shu, SUN Qi-zhi, LIU Wei. Numerical simulation of implosion of solid liner driven by disk explosive magnetic generator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(2): 77-82.
- [8] Zhu P, Chen K, Xu C, et al. Development of a monolithic micro chip exploding foil initiator based on low temperature co-fired ceramic [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2018, 276: 278-283.
- [9] 郑建毅, 何闻. 脉冲功率技术的研究现状和发展趋势综述[J]. 机电工程, 2008, 25(4): 1-4.
ZHENG Jian-yi, HE Wen. Review of research actuality and development directions of pulsed power technology [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Magazine*, 2008, 25(4): 1-4.
- [10] Tasker D G, Lee R J, Gustavson P K. An explosively actuated electrical switch using Kapton insulation [R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1993, 93.
- [11] Baginski T A, Thomas K A. A robust one-shot switch for high-power pulse applications [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(1): 253-259.
- [12] Zhou Z, Ding G, Yang Z, et al. A micro-machined pulsed power switch based on Kapton films [C]//International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture. Beijing, China, 2010: 439-442.
- [13] 胡博, 李杰, 朱朋, 等. 基于 Parylene C 的单触发开关性能实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 233-237.
HU Bo, LI Jie, ZHU Peng, et al. Experimental investigation of one-shot switch based on Parylene C [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 233-237.
- [14] Xu C, Zhu P, Chen K, et al. A highly integrated conjoined single shot switch and exploding foil initiator chip based on MEMS technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(11): 1610-1613.
- [15] Ebenhöch S, Nau S, Häring I. Validated model-based simulation tool for design optimization of exploding foil initiators [J]. *Journal of Defense Modeling & Simulation*, 2014, 12(2): 189-207.
- [16] MIL-DTL-23659D, 电起爆器设计通用规范[S]. 2003.
- [17] 韩克华, 周俊, 任西, 等. 高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 1-6.
HAN Ke-hua, ZHOU Jun, REN Xi, et al. Effect of high voltage pulse power source equivalent parameter on exploding performance of bridge [J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 1-6.
- [18] Hu B, Xu C, Zhu P, et al. Characteristics testing of one-shot switch [C]//2016 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). Shanghai, China, 2016.
- [19] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 37-45.
HAN Min, ZOU Xiao-bing, ZHANG Gui-xin. Basic pulsed power technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 37-45.
- [20] Baginski T A, Thomas K A, Smith S L. A high-voltage single-shot switch implemented with a MOSFET current source and avalanche diode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, 44(2): 167-172.
- [21] 王波. 相变材料及聚合物中的复合应力波研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
WANG Bo. Research on stress waves of phase transition material and polymer under combined stress [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [22] 方叶林. 脉冲放电等离子体电磁特性的初步研究[D]. 南京: 南

京理工大学, 2008.

FANG Ye-lin. Preliminary study on electromagnetic properties of pulsed discharge plasma [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

[23] 胡博. 适用于爆炸箔起爆器的电爆炸等离子体开关技术研究

[D]. 南京:南京理工大学, 2016.

HU Bo. Research on the electro-explosive plasma switch applied for explosive foil initiator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

Conduction Mechanism of the Single Shot Switch Based on Electro-explosion of Diode

XU Cong¹, HU Bo², ZHU Peng¹, YE Ying-hua¹, SHEN Rui-qi¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Chinese People's Liberation Army Artillery Air Defense Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: Using microelectromechanical system (MEMS) technologies including magnetron sputtering, ultraviolet lithography and chemical vapor deposition, two kinds of high-voltage switches based on Schottky diode and p-n diode were designed and fabricated. Electrical characterizations were performed to investigate their performances under no-load condition, which showed that the current peaks of the two switches reached up to about 2000 A at 0.22 $\mu\text{F}/1500\text{ V}$ and 0.22 $\mu\text{F}/1200\text{ V}$, respectively. The influence of trigger capacitor, trigger voltage, main voltage, dielectric film thickness and bi-diode structure on the conduction performance of single shot switch was studied. It is revealed that the minimum trigger voltage decreased gradually with the increase of capacitance. Reducing the thickness of dielectric film, increasing the trigger voltage and main voltage are all beneficial to improve the current peak. Besides, bi-diode structure can also improve the current peak. Finally, according to the electrical curves of single shot switch, its action process can be divided into three stages, namely the electro-explosion of diode, the breakdown of dielectric film and the rise of pulse current. The conduction mechanism and resistance model of single shot switch were also established. The results indicate that the resistance of single shot switch is very low, almost negligible.

Key words: high-voltage switch; single shot; electro-explosion of diode; conduction mechanism; electrical resistance model; MEMS

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018331

(责编:姜梅)