

文章编号: 2095-4980(2017)05-0861-06

IGCT 在快脉冲条件下开通过程研究

杨晓亮, 罗光耀, 罗敏, 金晖, 王朋

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 集成门极换流晶闸管(IGCT)开关具有耐压高、通流能力强、工作重频高的特点, 然而在纳秒级脉冲功率系统中应用较少。本文以株洲南车生产的非对称性IGCT做开关, 通过搭建脉冲形成网络(PFN)纳秒级放电电路, 初步研究了IGCT在快放电过程中的开关导通情况。通过理论分析、数值模拟和实验验证发现, 目前工业领域的IGCT器件由于触发电流难以有效扩展导通, 导致IGCT导通速度存在饱和值, 很难在纳秒级别的脉冲下直接实现开关作用, 但可以作为脉冲压缩的前级开关使用。

关键词: 集成门极换流晶闸管; 固态源; 脉冲功率; 快脉冲

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0861

Research on fast pulse switching process of IGCT

YANG Xiaoliang, LUO Guangyao, LUO Min, JIN Hui, WANG Peng

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Integrated Gate Commutated Thyristor(IGCT) switches are widely applied in electric and electronics industry for its high voltage, large current and high working frequency. Nevertheless, IGCT switches are rarely adopted in nanosecond long pulse power systems. Through constructing nanosecond Pulse Forming Network(PFN) discharge electric circuit, the switching process of unsymmetrical IGCT produced by Rolling Stock Corporation(RSC) company is investigated under fast pulse conditions. Through theoretic analysis and numerical simulation, it shows that it is difficult for the triggering current to be expanded and switched efficiently, which causes the velocity of IGCT and expanding speed will reach saturated values, and therefore, the industrial IGCT cannot achieve a direct role in the nanosecond level switching pulses, but can be used as pulse compression pre-switch.

Keywords: Integrated Gate Commutated Thyristor; solid source; pulse power; fast pulse

目前应用于脉冲功率装置的开关技术主要包括以下4个方面: 快速通断技术; 同步技术; 高重复频率技术; 长寿命。其中, 难点在于大功率、长寿命和高重复率的开关技术。功率半导体开关有着长寿命、易于控制、稳定性高等特点, 在脉冲功率装置中应用越来越广泛, 并且有望将来代替传统的气体开关技术。IGCT是集成门极换流晶闸管的简称, 集成门级和门级换流晶闸管之间通过极低的阻抗连接而成, IGCT内部由几千个小门极换流晶闸管(Gate Commutated Thyristor, GCT)元件组成, 它们之间共用一个阳极, 而阴极和门极则分别并联, 利用门极电流实现控制器件的开通和关断。IGCT特性介于门控晶闸管(Gate Turn-Off thyristor, GTO)和绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)之间, 具有功率大, 耐压高, 开关频率高, 驱动功率小等优点, 特别适合用于中高压电路的开关器件^[1], 目前IGCT的商业水平最高可达2 200 A/4 500 V和1 800 A/5 500 V^[2]。有关IGCT固态开关在脉冲功率中的应用大部分集中在微秒量级脉宽的脉冲功率系统中, IGCT做前端开关也有成功地应用于废气处理、医学杀毒等民用设施的纳秒脉冲功率系统^[3-7]。株洲南车公司是我国目前唯一具有IGCT研制能力的企业, 其生产的IGCT芯片横向结构为数千条GCT基本单元并联而成的复杂指状门—阴极图形, 纵向分布为带缓冲层的PIN穿通型耐压结构, 通过低电感的门极结构封装后的GCT芯片与门驱动单元相连^[8], 其生

收稿日期: 2016-05-17; 修回日期: 2016-08-29

基金项目: 国家高技术发展支持项目(61404038,11205038); 黑龙江省博士后科学基金资助项目(LBH-Z14073); 中央基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.NSRIF.2015001)

产典型 IGCT 型号 CAc400045(含反峰二极管)。

本文以株洲南车生产的非对称性逆导 IGCT 作为主放电开关, 根据 IGCT 的内部结构、工作原理及其外部电学特性, 首先分析了 IGCT 的内部结构和导通过程, 随后运用 PSPICE 软件建立了 IGCT 的双晶体管电学模型, 然后通过脉冲形成网络搭建数百纳秒级的脉冲放电回路实验初步研究了 IGCT 在快放电过程中的开关导通情况。

1 IGCT 原理和仿真

IGCT 是将门极驱动单元(Gate drive Unit, GU)与 GCT 通过印刷电路板连成整体, 在 GU 的印刷电路板上布置了低感大电容与功率的 MOSFET, 正是这种电容与 MOSFET 以及特殊的驱动电路所具有的低杂散电感特性, 才形成了 IGCT 硬驱动的基础。IGCT 与 GTO 一样, 都是 4 层 3 结器件, 从阳极到阴极依次为 J1,J2 和 J3, 结构见图 1。

在短脉冲条件下, 固态开关的开通速度直接决定了输出脉冲的前沿、脉宽等特征参数。100 ns 左右的长脉冲更关心开关的导通过程, 关断则由主电路放电完成自然关断。固态开关的开通时间一般指的是阻断状态在门极加入一特定的脉冲电流后, 器件转入导通状态所需的时间。IGCT 和普通晶闸管的开通瞬态过程基本相同, 分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 延迟时间, 从开始施加门极脉冲至阳极电流上升到其终值 10%的这段时间; 第 2 阶段, 上升时间, 阳极电流从 10%上升到 90%的时间; 第 3 阶段, 扩展时间, 阳极电流达到 90%后, 电流缓慢横向扩展, 直到整个阴极都导通的时间。

开始导通前, 结 J1 和 J3 处于正向偏置状态, 结 J2 处于反向偏置状态, 电压主要由 J2 承受。J1 正偏导致 J1 的 N 区(J1 的 N 区和 J2 的 N 区共用, 以下采用了类似说法)空穴的注入, 引起电位抬高, 这时需要向其中提供电子使 N 区保持中性。但是, 由于 J2 处于反偏, J2 的 P 区没有电子的注入, 此时电子只能由空间电荷区激发的热电子提供, J2 的情况类似。因此, 流过器件的电流仅为热激发产生的漏电流, 开关处于阻断状态。当触发信号施加在晶闸管门极上时, 电子注入到 J3 的 P 区, 并通过扩散在 J2 的 P 区中进行横向和纵向扩展。横向扩展使得晶闸管触发开通区域不断扩大, 为电流通过晶闸管整个管芯做准备。纵向扩展使得电子穿越空间电荷区边界后, 经过电场加速到达 J1 的 N 区上侧, 引起电位降低, 从而加速空穴的注入; 空穴再经过电场加速到达 J1 的 N 区的下侧, 再进入 J2 的 P 区, 此时这一过程相当于强化了触发条件, 起到了正向反馈的作用。如此循环, 开关最终开通, 具体导通过程参见图 2。载流子在这一过程中经历了扩散——漂移——再扩散——再漂移的循环过程, 直至开关进入导通状态^[8]。

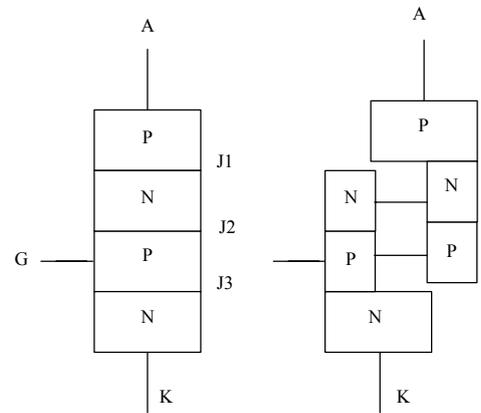


Fig.1 Structure and bi-thyristor equivalent of IGCT
图 1 IGCT 结构和双三极管等效图

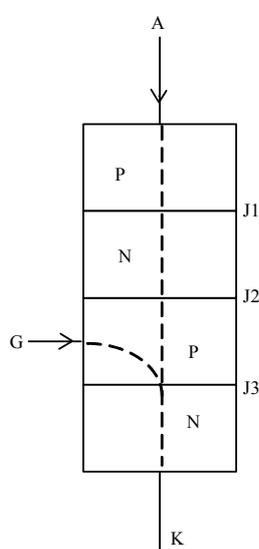


Fig.2 Switching process of IGCT
图 2 IGCT 导通过程

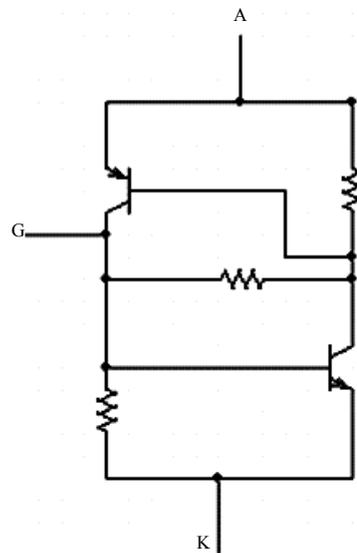


Fig.3 Single Hu-Ki of IGCT
图 3 IGCT 的单 Hu-Ki 模型

总之, IGCT 导通时门极施以正电压, 此时 IGCT 处于 NPN 晶体管状态, 晶体管作用大于晶闸管作用。转入导通后, GCT 仍可用 2 个正反馈的晶体管, 其强烈的正反馈使 2 个晶体管都饱和导通。所以当 IGCT 工作在导通状态时, 是一个像晶闸管一样的正反馈开关, 通过前面的分析可知, 用双三极管等效可以定性反映出 IGCT 的导通过程, 通常在 2 个三极管中引入 3 个电阻和其他必要元件, 由此构成所谓的 Hu-Ki 模型, 见图 3。同时 IGCT 是由门极包围的多个元胞组成, 每个元胞可等效成 1 个双三极管电路, 则整个器件可用多个双三极管和耦合元件构成 Hu-Ki 模型并联。并联的 Hu-Ki 模型用延时电路来描述各层之间触发信号的传输延时, 用互感来描述不同元胞间的相互作用, 当并联“Hu-Ki 模型”的个数大于 2 时, 进一步增加并联的个数对仿真精确度并没有明显的改善, 2 个 Hu-Ki 模型并联被认为是最优选择, 此类 IGCT 的仿真方法, 称为 IGCT 的电学模型法。

2 IGCT 快脉冲放电模拟

混南车公司生产的另一型号 CAC100-060 型 IGCT 开关通过了 2.7 kV, 82 kA(1 ms)和 $dI/dt \approx 6 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 的重频脉冲放电试验, 在电容器充电电压为 7.68 kV, 2 只 IGCT 串联的开关脉冲电流峰值达到 85 kA。经计算, 在脉冲宽度数百微秒的条件下, 该种类的 IGCT 导通初始阶段的 dI/dt 耐量高达 $20 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 如果该 dI/dt 耐量在百纳秒级脉冲下依然成立, 则该开关十分有潜力在脉冲功率中作主放电开关。根据实验需求, 实验选取的 IGCT 型号为 Cac400045, 该型号的 IGCT 为南车公司所能提供的最高单体耐压水平的 IGCT, 主要技术参数见表 1。

表 1 IGCT 型号 Cac400045 主要参数列表
Table 1 Primary performance parameters of IGCT marque Cac400045

parameter	symbol	rated value	unit	condition
repetitive peak voltage	U_{DRM}	4 500	V	standard
reverse voltage	U_{RRM}	17	V	without reverse diode
pulse peak current	I_{PK}	120	kA	standard
dI/dt	dI/dt	20	$\text{kA}/\mu\text{s}$	85 kA(1.5 ms single pulse)

为了研究 IGCT 在快脉冲(前沿小于 50 ns)的放电回路中的开关特性, 搭建电路如图 4 所示。用 5 kV 直流源对脉冲形成网 PFN 充电至 IC (图中显示为 $IC=1\ 000 \text{ V}$), 充电完毕后用 IGCT 作主放电开关(图中已用理想开关 U_1 代替), 通过驱动和触发电路产生光脉冲作用于集成门级, 使得开关导通对负载 R_1 放电。

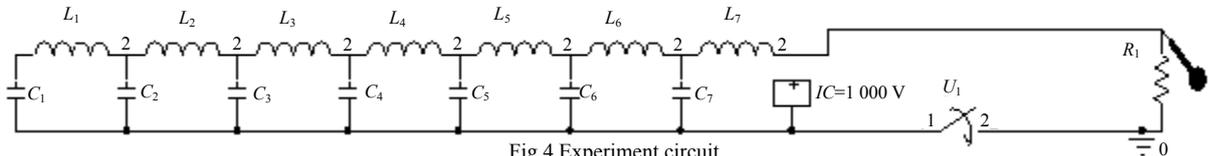


Fig.4 Experiment circuit
图 4 实验回路电路

当开关导通时, 根据电路方程和电路理论, PFN 放电脉冲形成过程如下: C_7 通过 L_7 对负载 R_1 放电, 经过延迟时间 $(L_7 C_7)^{1/2}$ 后, C_6 经 L_6 和 L_7 对同一负载放电, 以此类推。显然, 由于各电容器储能相同, 而放电时间存在差异, 各个电容依次放电的波形叠加就是脉冲形成网络的脉冲产生波形。从傅里叶分析角度理解, 脉冲形成网络是利用 N 个类正弦波来合成 1 个方形脉冲, N 值越大, 近似程度越高, 合成函数的边沿更陡峭, 顶部起伏也逐渐趋于平坦。也可以认为传输线可以看成是由微小的 LC 单元连续组成的脉冲形成网络。依据电路理论, 匹配阻抗 Z 、脉冲宽度 τ 、上升沿 t_r 遵循如下电路关系式(1)。

$$\left\{ \begin{aligned} Z &= \sqrt{L/C} \\ \tau &= 2n\sqrt{LC} \\ t_r &= \arctan(\omega/\delta)/\omega \\ \omega &= \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{Z}{2L}\right)^2} \\ \delta &= \frac{Z}{2L} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

经计算，当 7 级脉冲形成网络 PFN 中的电容 C 为 850 pF，电感 L 取 85 nH 时，此条件下匹配阻抗 Z 为 10Ω ，脉冲宽度 120 ns，前沿 t_r 约 10 ns。当用 PSPICE 模拟此放电回路时，开始认为 IGCT 只起到开关作用，以开关延时 T_{tran} 为变量，在此时间内开关电阻从 $1 M\Omega$ 线性降低至 $50 m\Omega$ (PSPICE 默认值)，当 PFN 放电初始电压 1 kV，模拟结果见图 5。图中从左至右分别为放电电压 1 kV，开关延时 T_{tran} 从 1 ns 变化至 1 501 ns 时的 R_1 上的放电波形，显然当开关较快导通时，如 1 ns 导通时，所得的波形和理论波形差别不大，十分符合依据关系式(1)计算的脉冲参数。而当开关较慢导通时，放电脉冲幅值较小，这主要是因为开关阻抗变化太慢造成充电电压消耗，部分能量没有被负载吸收而消耗在开关阻抗上。采用 Hu-Ki 模型模拟时，三极管的参数选择十分重要，一般通过等效电路将厂家提供的器件的主要电气参数与模型参数相联系来确定主要模型参数^[9]，一些非主要参数则取默认值，电学模型采用的 PNP 和 NPN 三极管主要电学参数如图 6 所示，相关参数通过厂家实验数据得出，通过选择较为理想的三极管和其他元件参数，可得到十分理想的负载上放电波形。

由于是快脉冲放电，触发和驱动源的脉宽应当取远超过放电脉宽的数值。通过实验发现，当电流驱动上升较慢至可以触发时，或者门级杂散电感过大，放电脉冲幅值变化明显。放电脉冲幅值对门级驱动信号较为敏感。分别以触发脉冲源的电压上升前沿 T_r 和门级驱动电感 L_g 为变量，2 种情况参数扫描的结果如图 7 所示。

图 7(a)表示触发源驱动电压脉冲前沿从 1 ns 变化至 2 501 ns 的放电脉冲波形，可以看到，随着前沿的延长，放电脉冲越来越宽，而脉冲幅值越来越小，约经过 3 000 ns 的驱动前沿后，放电脉冲波形只有理论值的一半左右。图 7(b)表示放电脉冲随门级电感的变化趋势，门级电感 L_g 从 1 nH 变化至 2 501 nH，每间隔 500 nH 进行 1 次扫描。显然，随着门级电感的增大，放电脉宽变宽，放电幅值显著减小，门级杂散电感增大至约 2.5 μ H 时，输出脉冲峰值降低为理论值的一半。

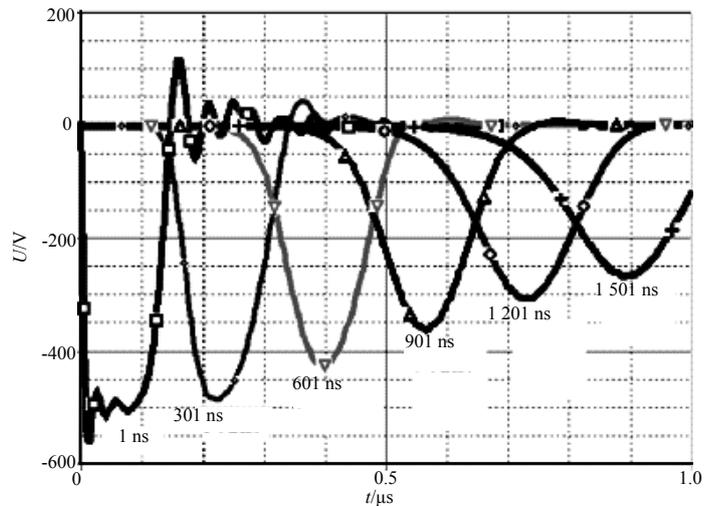


Fig.5 Waveform of fast pulse discharge(taking IGCT as ideal switch)
图 5 理想开关模拟快脉冲放电波形

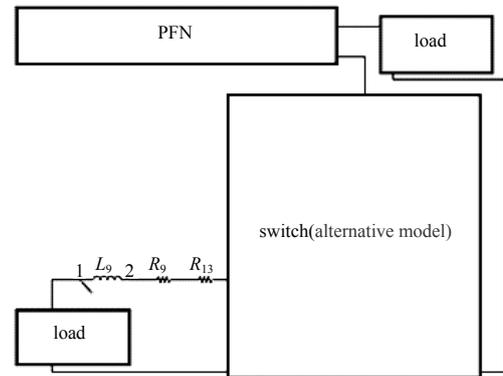
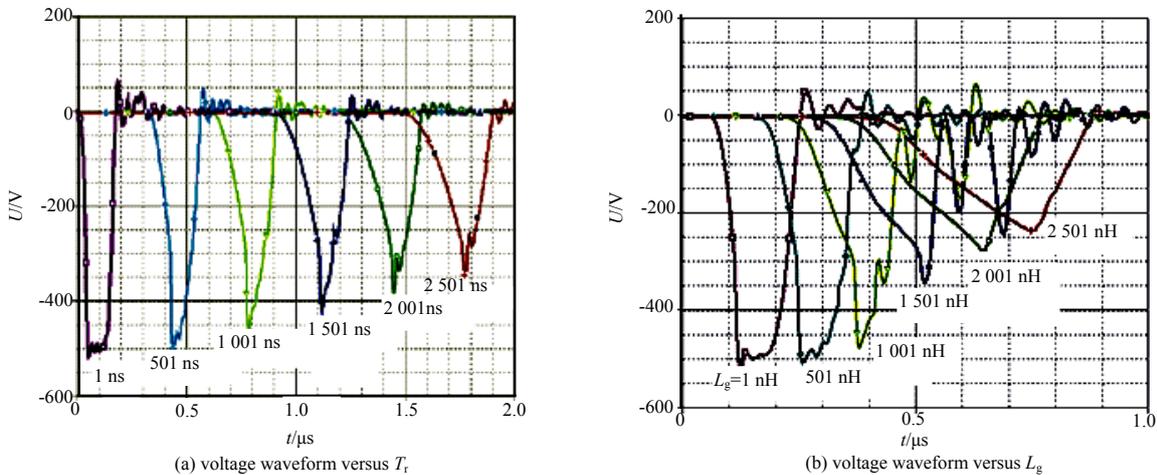


Fig.6 Fast pulse discharge circuit (taking IGCT as Hu-Ki model)
图 6 Hu-Ki 模型仿真快脉冲放电电路



(a) voltage waveform versus T_r
(b) voltage waveform versus L_g
Fig.7 Waveform of discharge (taking IGCT as Hu-Ki model)
图 7 电学模型放电波形

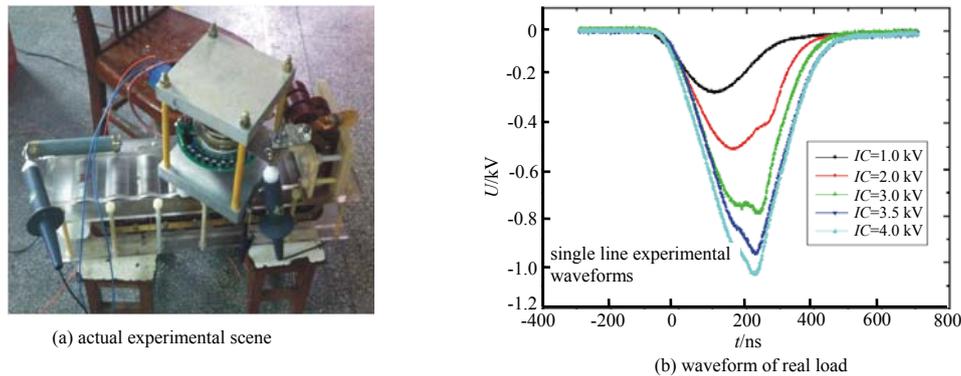


Fig.8 Experiment scene and discharge waveforms
图8 实际实验场景和放电波形

3 IGCT 实验及分析

实验搭建电路如图 8(a), 其电路结构见图 4, 采用单线 PFN 结构, PFN 中电容为 850 pF, 电感值为 85 nH, 固体电阻负载 R_1 为 10 Ω 。用 5 kV 直流源对脉冲形成网 PFN 充电至 IC, 充电完毕后用 IGCT 做主放电开关, 通过驱动和触发电路产生光脉冲作用于集成门级, 使得开关导通对高功率负载 R_1 放电, 用示波器高压探头测量此放电信号, 此信号结果如图 8(b), 初始条件 IC 为从 1 kV, 2 kV 逐步上升至 4 kV, 可以看到实际放电脉冲幅值电压只有理论值的一半左右, 且随着充电电压的升高, 充电波形变化不大, 脉宽前沿等参数较为稳定, 但二分之一关系基本维持。

通过前面的分析和模拟初步认为, IGCT 工作过程从断态到通态耗时太长, 主要在于门级触发信号不能很好地作用于 GCT 芯片。对于门级触发信号, 实际测量触发光脉冲转换后的电压峰值 3.36 V, 前沿 137 ns, 脉宽不可调, 仅前沿略变。当 PFN 充电电压为 1 kV 时, 流过 IGCT 的最大电流小于 100 A, 随着触发电流的增大, 开通时间趋于一个饱和值, 约为几百纳秒左右。IGCT 虽为目前功率等级最大的全空型半导体开关器件, 但本实验所用的 IGCT 为微秒级中压水平电路系统专用, 其低压大电流的设计原则和使用需求使得绝大数 PN 结面积浪费, 而 PN 结的截面积与饱和电流和最大电流能力基本成正比, 在纳秒或者数百纳秒量级的高压小电流快脉冲中 IGCT 特有的关断技术没有得到充分利用。

通过初步实验模拟和导通过程分析, IGCT 集成驱动源的 MOSFET 在快脉冲条件下已经不能视为理想开关, 电子在 PN 结中的拓展过程和运动时间, 还有介质的弛豫时间(和电容率成正比, 和电导率成反比的常数)对开通过程有重要影响。南车公司特有的光纤触发信号经过隔离无法提供快前沿导通电流, 常规认为的大电容供电, MOS 理想开关, 极低电感带来快前沿条件已经不能满足, 这使得器件不能迅速导通, 在此过程中认为开关阻抗变化缓慢, 进而影响前沿充电电压。这是 IGCT 无法迅速导通的最重要原因。直接利用 IGCT 作为 PFN 主放电开关导通时间难于满足需求。一般认为除了改进外电路, 发掘已有半导体开关的潜力之外, 开发新结构和复合开关器件是发展开关的有效方法。除此之外, 研究新材料的开关器件也能提高开关的导通速度^[10-11]。

4 结论

本文以株洲南车生产的非对称性逆导 IGCT 作为主放电开关, 根据 IGCT 的内部结构、工作原理及其外部电学特性, 首先分析了 IGCT 的内部结构和导通过程, 随后运用 ORCAD 软件建立了 IGCT 的双晶体管电学模型; 通过 PFN 搭建纳秒级的放电回路实验初步研究了 IGCT 在快放电过程中的开关导通情况。初步分析和实验模拟表明: IGCT 的设计原理和制造工艺决定了在高压小电流快前沿的快速过程中无法快速提供大电流。电路杂散电容电感和测量等原因使得目前工业领域成熟的 IGCT 开关在纳秒级脉冲条件下无法实现快开通。IGCT 的设计和制造工艺特性决定了为了抑制 dI/dt 电感上的感应高压, 以免造成 IGCT 动态雪崩击穿, 必须加入电阻电容二极管(RCD)吸收回路。同时, 门极电路复杂, 反并联二极管反向恢复 dI/dt 能力的限制, 必须设置抑制 dI/dt 的吸收钳位电路。这些因素决定了目前工业领域的 IGCT 器件由于触发电流难以有效扩展导通, 导致 IGCT 导通速度存在饱和值, 很难在纳秒级别的脉冲下直接实现开关作用, 但可以作为脉冲压缩的前级开关使用。

参考文献:

- [1] 余岳辉, 梁琳. 脉冲功率器件及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2010. (YU Yuehui, LIANG Lin. Pulsed Power Devices and

- Applications[M]. Beijing:China Machine Press, 2010.)
- [2] 赵籍九,尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. (ZHAO Jijiu,YIN Zhaosheng. Particle Accelerator Technology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2006.)
- [3] POKRYVAILO A,YANKELEVICH Y,WOLF M ,et al. A high-power pulsed corona source for pollution control applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(5):2045-2054.
- [4] TOURY M,VERMARE C,ETCHESSAHAR B,et al. Iderix:balancing circuit for a 5 kV/50 ns pulsed power switch based on SiC JFET super cascode[C]//16th International Pulsed Power Conference. New Mexico Albuquerque:IEEE, 2007:599-602.
- [5] BUTSCHEN T,ETEXBERRIA G S,STAGGE H,et al. Gate Drive Unit for a dual-GCT[C]// 8th International Conference on Power Electronics ECCE Asia. The Shilla Jeju,Korea:[s.n.], 2011:2419-2426.
- [6] HARTMANN W,ROEMHELD,ROHDE M,et al. All-solid-state power modulator for pulsed corona plasma reactors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,14(4):858-862.
- [7] WELLEMAN A,LEUTWYLER R,WALDMEYER J,et al. High current,high voltage solid state discharge switches for electromagnetic launch applications[C]// Semiconductors CH-5600. Lenzburg:ABB Switzerland Ltd, 2008:1-5.
- [8] 郭帆,何小平,王海洋,等. 晶闸管触发开通特性[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(10):2483-2487. (GUO Fan,HE Xiaoping,WANG Haiyang,et al. Thyristor trigger opening characteristic[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2012,24(10):2483-2487.)
- [9] 段大鹏,江秀臣,孙才新,等. IGCT 的原理性电学模型与动态特性仿真[J]. 高电压技术, 2008,34(1):196-200. (DUAN Dapeng,JIANG Xiuchen,SUN Caixin. Principle electrics model of IGCT and dynamic characteristic simulation[J]. High Voltage Engineering, 2010,34(1):196-200.)
- [10] 湛怡,夏连胜,王卫,等. 基于光导开关和平板线的固态脉冲功率技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,2(12):32-36. (CHEN Yi,XIA Liansheng,WANG Wei et al. Solid-state pulsed power technology based on PCSS and planar lines[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,2(12):32-36.)
- [11] 甘孔银,黎明,金晓,等. 用于 10 kV IGBT 固态开关的脉冲变压器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2005,3(3):63-65. (GAN Kongyin,LI Ming,JIN Xiao,et al. Design of pulse transformer for 10 kV IGBT solid switch[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Engineering Technology, 2005,3(3):63-65.)

作者简介:



杨晓亮(1986-), 男, 河南省新县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事脉冲功率及磁场计算的相关研究.email:a020602@126.com.

罗光耀(1976-), 男, 广西壮族自治区上林县人, 副研究员, 主要从事脉冲功率初级能源技术研究.

罗 敏(1972-), 男, 四川省南充市人, 副研究员, 主要从事脉冲功率技术研究.

金 晖(1972-), 女, 四川省绵阳市人, 副研究员, 主要从事脉冲功率初级能源技术研究.

王 朋(1987-), 男, 江西省萍乡市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术研究.

勘 误

2017 年第 2 期目次中

“太赫兹探测器读出电路的单电子晶体管制备……………安健飞, 成彬彬, 冯 正, 等 (183)”
改为

“0.14 THz 近垂直入射下的水面杂波反射特性初步研究……………安健飞, 成彬彬, 冯 正, 等 (183)”