

IGBT 开关诱导产生机械应力波的 低压试验研究

周雅楠¹, 胡毅², 何赞泽¹, 邹翔¹, 耿学峰¹,
黄守道¹, 白芸¹, 刘菲¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 国网安徽省电力有限公司芜湖供电公司, 安徽芜湖 241000)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)是新能源发电、智能电网、高压输电等领域实现电能有效变换和利用的关键电力电子设备。IGBT 的状态监测是电力电子装置可靠性监测的基础。现有基于电磁热参数的检测方法难以同时满足快速、无损和在线的检测需求。在开关状态下, IGBT 内部电磁力多物理场相互作用会产生机械应力波信号, 信号的特征参数可有效表征 IGBT 的状态, 因此未来有潜力成为一种新的 IGBT 状态监测方法。该文从信号的产生机理、试验系统的搭建、试验结果分析 3 个方面对低压条件下 IGBT 的不同开关状态所产生的声发射信号展开研究, 得出 IGBT 在开通和关断瞬间都会产生应力波信号, 并得出信号的主要组成成分和频率范围; 开通时刻的应力波信号脉冲尖峰幅值与集电极电压 V_{CE} 呈线性相关; 高频电磁波与 V_{CE} 相关, 脉宽会影响频率点的密集程度, 并且无 V_{CE} 时也会有应力波信号产生。

关键词: IGBT; 脉冲测试; 声发射; 机械应力波

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.013 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2022)06-0116-09

Low voltage experimental studies on mechanical stress wave induced by IGBT switch

ZHOUYanan¹, HU Yi^{1,2}, HE Yunze¹, ZOU Xiang¹, GENG Xuefeng¹,
HUANG Shoudao¹, BAI Yun¹, LIU Fei¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Wuhu Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: Insulated gate bipolar transistor (IGBT) is the key power electronic device in the field of new energy power generation, smart grid and high voltage power transmission. The condition monitoring of IGBT is the basis for reliability monitoring of power electronic devices. Existing detection methods based on electromagnetic thermal parameters are difficult to meet the needs of fast, non-destructive, and online detection at the same time. In the switching state, mechanical stress wave signals generated due to the interaction of electromagnetic forces within the IGBT with multiple physical fields. The characteristic parameters of the signals can characterize the state of IGBT effectively, so it has the potential to become a new IGBT state monitoring method in the future. This paper studies the acoustic emission signals generated by different switching states of the IGBT under low voltage conditions from three aspects: signal

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52077063); 长沙市科技计划项目(2004006)

通信作者: 何赞泽(1983—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事电力设备状态评价与电磁无损检测方面的研究; E-mail: yhe@vip.

generation mechanism, test system construction, and test result analysis. It is concluded that the IGBT generates acoustic emission signals both at the moments of switching on and switching off. The main components and frequency range of the signal are obtained. The peak of the acoustic emission signal pulse at the time of conducting is linearly related to the collector voltage V_{CE} . High frequency electromagnetic waves are related to V_{CE} . The pulse width affects the density of frequency points and acoustic emission signals even generated without V_{CE} .

Key words: insulated gate bipolar transistor (IGBT); pulse test; acoustic emission; mechanical stress wave

绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 是实现高效高质电力电子电能变换技术的基石,在大功率特种电源、高铁牵引、新能源发电、智能电网等国防与工业领域应用广泛^[1-3]。IGBT 一旦发生故障或者性能弱化,会影响电力电子装置的正常运行,进而给变换系统和使用电力电子设备的系统带来巨大的国民经济损失^[4-5]。而 IGBT 可靠性与其开关特性紧密相关,开关损耗会影响装置的性能和效率。器件开关特性与开关损耗紧密相连,器件开关过程的 du/dt 和 di/dt 可能会引起过电流、过电压、电磁干扰等问题^[6-11]。因此,IGBT 运行参数的检测和状态的实时监测一直都是国内外专家学者的研究热点。

利用材料内局域源能量快速释放产生瞬态弹性波的声发射检测技术已广泛应用于石油、化工、电力和航空航天等领域,实现材料缺陷和物理特性的检测,具有快速、非侵入式和实时在线检测等特点。IGBT 具有导通与关断 2 种工作状态,这 2 种工作状态会产生空穴、电子相对运动和复合,从而在器件内由电磁应力的快速释放产生瞬态弹性波,传递到器件表面形成声发射信号,可以用声发射测量系统捕获到这种信号。因此,基于应力波的状态监测方法未来有潜力成为一种新的 IGBT 可靠性监测方法。近几年国内外部分单位对于声发射技术在 IGBT 检测监测领域展开了研究。文献[12]在 2014 年使用双脉冲测试电路和声发射测量系统检测到 IGBT 在关断瞬间会产生声发射信号,并通过信号传播延时的方法证明了声发射信号源于 IGBT 内部;文献[13]通过采用 2 种不同带宽的传感器对 IGBT 关断瞬间产生的声发射信号进行测量,发现不同型号的传感器捕获到的声发射信号存在不同;文献[14]在 2015 年提取了 IGBT 门-射极短路或集-射极短路失效时产生的声发射信号,发现 2 种与失效模

式相关的声发射信号,2 种信号明显不同,一种出现在 IGBT 失效发生数 10 ms 后,持续时间通常小于 1 ms;一种出现在 IGBT 失效瞬间,信号持续大约为 1 ms 或更长时间;文献[15]在 2016 年使用 IGBT 功率循环测试电路与声发射测量系统,提取了 IGBT 老化过程中产生的声发射信号,发现随着老化程度加深,声发射波信号在 50~150 kHz 频率范围内幅值逐渐减小;文献[16]通过试验提取了 IGBT 器件关断产生的机械应力波,并进行时域和频域分析,获得其特征参数;文献[17]提取了在 IGBT 模块在功率循环过程中的声发射信号,发现声发射信号与通态电压降有很强的相关性,进一步说明声发射检测技术在 IGBT 状态监测领域有很好的应用前景;文献[18]对 IGBT 器件关断机械应力波的进行分析,发现高频分量的 2 个脉冲波时间间隔与驱动信号的宽度相同,两脉冲波的频率组成成分单一并且相位相反,其中高频分量与集电极电流关联度不高,低频分量的不同特征参数均与关断电流呈强线性关系。

本文首先阐述应力波信号的产生机理,再通过搭建脉冲测试电路和声发射信号采集系统提取 IGBT 在不同条件下所产生的应力波信号;并分析提取应力波信号时域和频域的特征参数,得出不同状态下应力波信号的特征区别与联系,同时建立 IGBT 参数与应力波特征参数之间的关系,为后续研究高压或老化条件下 IGBT 的开关应力波信号和 IGBT 的实时检测监测奠定基础。

1 应力波/声发射产生机理分析

如图 1 所示,IGBT 是一种五层三结的 MOS 控制性器件。它的控制端即门极通常为 MOS 的栅极,门极和发射极都位于器件的上表面。沟道位于 p 基区表面,紧贴着控制区,与 2 次扩散的横向结深

有关。发射区位于 p 基区中,并且和 p 基区短路,可以消除 n^+ 发射区、p 基区和 n^- 漂移区所形成的寄生 npn 晶体管。IGBT 的输出端为集电极,在器件的下表面。在 p+集电区和 n^- 漂移区之间有一层缓冲层 n,缓冲层可以压缩 n^- 漂移区的电场,还能够提高 IGBT 的导通和开关能力。

本试验主要为了探究 IGBT 在单脉冲的驱动条件时的 3 种不同状态下所产生的应力波信号特征,3 种状态下 IGBT 内部微观结构变化分别对应图 1 的 (a)、(b)、(c)。其中,状态 1:门极电压 V_{GE} 大于开启阈值电压 V_T 并且无 V_{CE} ; 状态 2: V_{GE} 大于开启阈值电压 V_T 并且 V_{CE} 大于零; 状态 3: V_{GE} 小于等于零并且 V_{CE} 大于零。

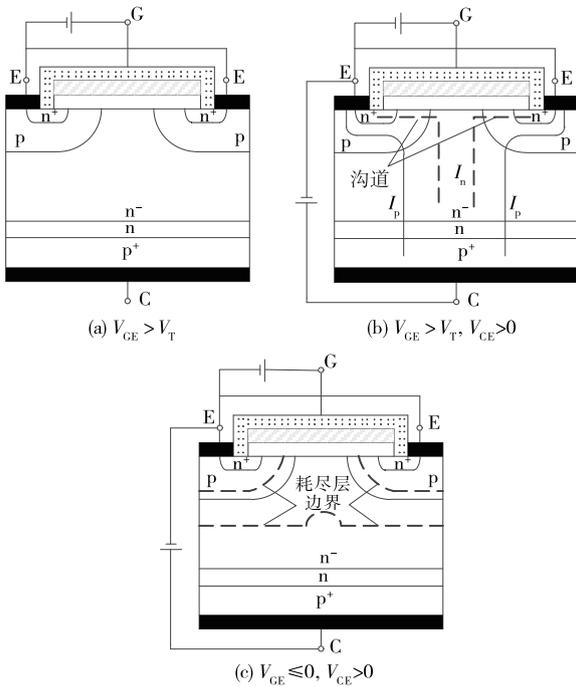


图 1 IGBT 不同状态下的微观结构

Figure 1 Microstructure diagram of IGBT in different states

状态 1 无 V_{CE} 时即器件无关断电流,此时给门极施加正向脉冲触发信号,相当于给器件的门极和发射极施加了电荷,门极和发射极可看成 2 个极板,极板上有了电荷就会在极板附近产生电场,只不过该电场的强度较弱。外加电场瞬间会使 IGBT 内部电场会发生变化,电场变化会产生磁场,器件内部电子会受到洛伦兹力作用,洛伦兹力带来的能量变化会以机械应力波的形式传递出来,被声发射传感器

耦合。同理,触发脉冲消失瞬间也会产生类似应力波信号。该状态下的 IGBT 是不处于正常工作状态的,研究这种条件并不是无实际意义。由于对机械应力波产生机理还处于试验探究阶段,所了解的知识体系还不够完善,研究这种状态的主要目的是为了深入了解并探究机械应力波信号的来源与影响因素,再与 IGBT 正常工作条件下形成对比,进而推出一定的结论。

状态 2 给门极施加脉冲信号,使得 V_{GE} 大于开启阈值电压 V_T , p 基区表面反型,形成 MOS 导电通道, n^+ 发射区的电子会通过导电沟道进入 n^- 漂移区,导致 n^- 漂移区的电位降低,从而 p+集电区的空穴会通过 n 缓冲层向 n^- 漂移区注入。进入 n^- 漂移区的电子会与空穴不断复合,形成电子电流,部分空穴会经 p 基区流入发射极,形成空穴电流,使得 IGBT 开通。整个过程持续时间极短,瞬间通过 IGBT 的电流变化率很大,会在器件内部产生变化的磁场,电子会受到洛伦兹力的作用,这种力会导致内部结构形变和振动,从而产生机械应力波信号,这种机械应力波信号会沿着器件的焊料层和基板传播出来。同时开通瞬间,使得 IGBT 所承受的电压和流经 IGBT 的电流会发生剧烈变化,因此产生有脉冲特征的电磁能量变化,这种能量变化会生成电磁波,也会被传感器所耦合。

状态 3 通过门电极短接或反接使得门极电容放电,即 V_{GE} 小于等于零时, p 基区表面的 n 型反型层会消失,无法形成导电沟道,这样 n^+ 发射区的电子就无法注入到 n^- 漂移区, IGBT 内部无电子的运动就会导致没有电子电流和空穴电流的产生,进而导致发射极电流迅速减小,导致 IGBT 关断。同样关断过程极短,也会在器件内部产生变化的磁场,电子会受到洛伦兹力的作用,这种力使得器件内部发生形变,进而以机械应力波的形式传递出来。由于关断时的电流变化率与开通时相反,就会导致所产生的应力波信号的相位相反。同时施加的是脉冲信号,当 V_{CE} 存在时,电流在变为零的过程中,也会生成具有脉冲特征的瞬态电磁波传递出来,被传感器所耦合。接下来通过搭建脉冲测试平台、大量对比试验以及对信号特征参数进行分析,探索这 3 种状态下所生成的应力波信号特征。

2 试验系统

试验系统由 IGBT 脉冲测试电路和声发射信号测量平台两部分组成,如图 2(a)所示。脉冲测试电路原理如图 2(b)所示,采用的是单脉冲测试时序的感性负载电路,选择单脉冲触发主要是为了易于采集、记录以及分析 IGBT 开关所产生的应力波信号,当然采用双脉冲的方式也是可行的。测试器件型号为 IGW30N60TP,电感值为 $100\ \mu\text{H}$,通过直流电压源 DC 给电路充电,同轴电阻的型号是 SDN-414-01,阻值为 $0.01\ \Omega$,其外壳可有效屏蔽外部噪声源,可以测量小电流值和瞬态电流。试验时使用国产 RIGOL 任意波形信号发生器给测试电路板加单脉冲触发信号,并使用示波器实时观测 V_{GE} 、 V_{CE} 、 I_{C} 波形。

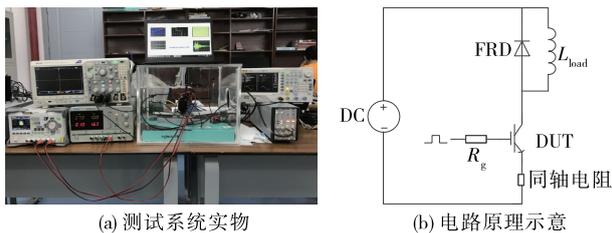


图 2 测试系统与电路

Figure 2 Test system and circuit

声发射测量平台包含压电传感器型号为 VS45-H(带宽为 $20\sim 450\ \text{kHz}$,带宽满足实际测量需求,后期工作会对比研究不同带宽传感器所采集的信号),放大器型号为 AEP5,声发射仪是德国 Vallen 公司生产的 AMSY-6(带宽 $10\ \text{MHz}$),如图 3 所示,测试时直接将传感器贴在 IGBT 正背面,可通过计算机上的声发射信号采集软件实时显示监测到的声发射信号。

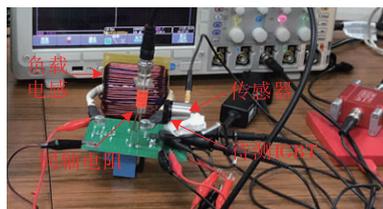


图 3 传感器位置放置示意

Figure 3 Schematic diagram of sensor location

试验测试时序如图 4 所示, t_1 时刻门极电压 V_{GE} 变高, IGBT 导通, 集电极电流 I_{C} 开始上升; t_2 时刻 V_{GE} 由正压变为负压, IGBT 关断, 得到关断过程的集电极电压 V_{CE} 和电流 I_{C} 的波形。

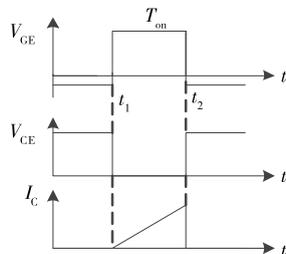


图 4 脉冲测试时序

Figure 4 Pulse test sequence diagram

3 试验研究

环境噪声过大会影响有效信号的采集,因此,测试前先使用声发射仪对环境噪声进行测试,得出环境噪声在 $35\ \text{dB}$ 附近上下波动,噪声信号的时域波形如图 5 所示,可看出信号幅值为 $0.04\ \text{mV}$,因此可设置信号的采样阈值为 $45\ \text{dB}$,有效排除环境噪声对信号采集时的干扰。假如测试的噪声分贝过大,需采取有效方法对噪声进行屏蔽。

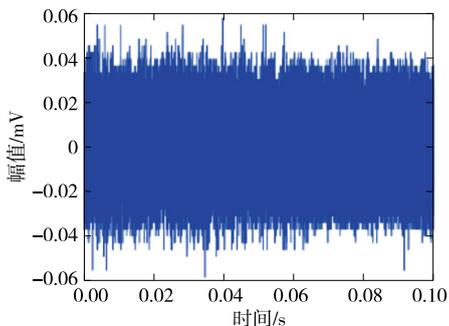


图 5 噪声信号的时域波形

Figure 5 Time-domain waveform of noise

3.1 应力波信号的成分分析

传感器的耦合方式有 2 种:①耦合剂耦合,使用的耦合剂为真空封脂;②空气耦合(近似看作无介质),主要用于对比试验。

在使用真空封脂耦合并且其余条件保持一致的情况下,状态 1、2 下所采集的应力波信号如图 6 所示,对比发现:当 V_{CE} 存在时,可发现应力波信号的

时域波形中有两处明显的高幅值信号尖峰,且两处信号尖峰的间隔时间正好为信号的脉冲宽度,同时存在明显的高频成分;当 V_{CE} 为 0 V 时,相同条件下,无类似尖峰信号,也无高频成分。

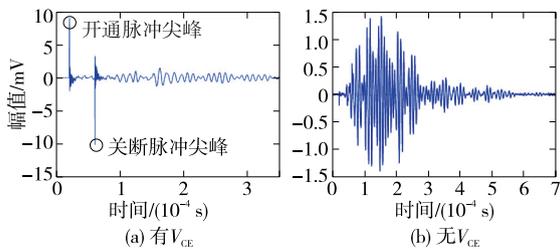


图 6 有、无 V_{CE} 时应力波信号时域波形

Figure 6 Time-domain waveforms of stress wave signal with/without V_{CE}

分别对 V_{CE} 为 30、0 V,脉宽为 40 μs 时进行短时傅里叶变换,得到应力波信号时频,如图 7 所示,对比发现:有 V_{CE} 时信号的开通和关断瞬间能量明显强于无 V_{CE} 时,可推断出 IGBT 开关所产生的应力波信号是由 V_{CE} 和 V_{GE} 叠加所产生,并且高频信号与 V_{CE} 有关。

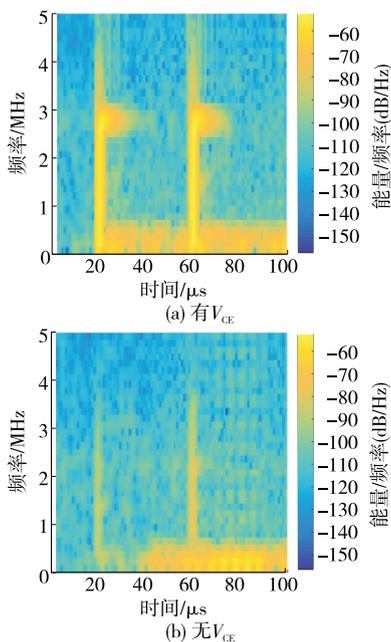


图 7 有、无 V_{CE} 时应力波信号时频谱

Figure 7 Time-frequency spectrums of stress wave signal with/without V_{CE}

为了验证 IGBT 开关状态下产生的应力波信号高频部分成分为电磁波,低频信号是机械应力波,可根据机械应力波与电磁波的传播方式不同,电磁波

不需要介质就可以传播,而机械应力波传播需要介质,因此,采取空气耦合的方式与采用耦合剂耦合方式形成对比,提取相同条件下的声发射信号。空气耦合下有 V_{CE} 条件下的应力波信号时域波形如图 8 所示,空气可近似看成无介质,此种耦合方式下传感器探头与器件表面的间隙会使电磁波的信号减弱,但同时也阻碍了机械应力波的传播。

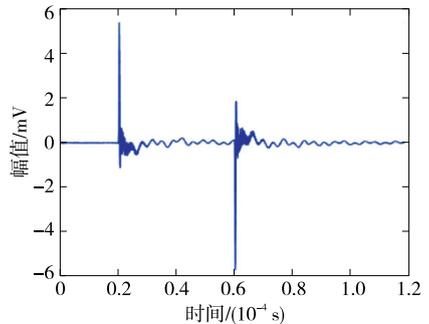


图 8 空气耦合下有 V_{CE} 的应力波信号时域波形

Figure 8 Time-domain waveform of stress wave signal with signal with V_{CE} under air coupling

通过上述对比试验可发现,IGBT 开关状态下所产生的应力波信号的成分包含低频和高频 2 个部分,低频信号是机械应力波,高频部分成分为电磁波,同时,IGBT 开关所产生的应力波信号是由 V_{CE} 和 V_{GE} 叠加所产生,并且高频信号与 V_{CE} 有关。

3.2 应力波信号的低频成分分析

信号的高频和低频主要根据信号频谱来分段,一般分为两段,并且以 300 kHz 进行分段。截取信号的高频段分析,发现高频主要集中在 2.7 MHz 处。信号频谱分段可以将 2 种频率的特征参数与 IGBT 电参数间建立联系。

状态 1 时 V_{CE} 设置为 0 V,对不同脉冲宽度下采集到的应力波信号进行分析,由文 3.1 中的成分分析可知,低频部分为机械应力波,因此,通过设置低频数字滤波器对采集到的应力波信号进行处理,截止频率设置为 300 kHz。由于正向脉冲时间极短,IGBT 在负脉冲时产生的应力波信号会与正脉冲时产生的机械应力波信号发生叠加,导致不同脉宽下的机械应力波的实际波形形状不同,但开通时峰值幅值基本相同,且频率成分一致,主要集中在 50~150 kHz 范围内。

状态 2、3 时 V_{CE} 不为零,分别对不同 V_{CE} 相同脉

宽、相同 V_{CE} 不同脉宽状态下的应力波信号进行分析。由于器件的整个开关过程时间极短,开通和关断产生的应力波信号会发生叠加现象,导致传感器耦合的信号为叠加后的信号。试验设置 V_{GE} 为 15 V,使用真空封脂耦合剂耦合,分别调节 V_{CE} 和脉冲宽度,观察 IGBT 开通时刻应力波信号的脉冲尖峰幅值,并记录如表 1 所示。

表 1 不同 V_{CE} 下声发射信号特征参数

Table 1 Characteristic parameters of acoustic emission signals under different V_{CE}

V_{CE}/V	不同脉宽(μs)下开通瞬间信号脉冲尖峰幅值/mV					
	10	20	40	60	80	100
10	2.7	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6
15	4.4	4.4	4.3	4.3	4.4	4.3
20	5.8	5.9	5.7	5.9	5.6	5.8
25	7.2	7.3	7.3	7.2	7.2	7.3
30	8.8	8.8	8.9	8.7	8.9	8.8

注:特征参数频率范围均为 50~150 kHz(低频)、2.7 MHz(高频)

根据表 1 中数据,以保持 V_{CE} 为 30 V 调整脉冲宽度、保持脉冲宽度为 40 μs 调节 V_{CE} 为例,分别画出 IGBT 开通瞬间应力波信号脉冲尖峰幅值与 V_{CE} 、脉冲宽度之间的拟合曲线,如图 9 所示。

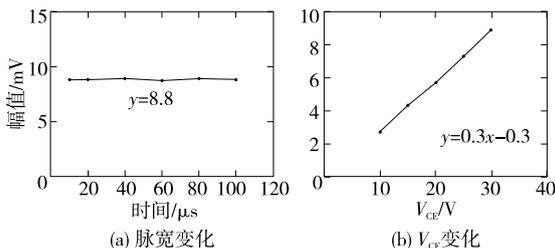


图 9 脉宽/ V_{CE} 变化与开通瞬间应力波信号幅值关系(未加滤波器)

Figure 9 Relationship between the change of pulse width/ V_{CE} and the amplitude of stress wave signal at the conducting moment(without filter)

当对信号低频成分进行分析时,需对试验采集到的信号加一个低通数字滤波器,截止频率为 300 kHz。低频为机械应力波信号,同样观察开通时刻声发射信号的脉冲尖峰幅值,并记录如表 2 所示。根据表 2 中数据,以保持 V_{CE} 为 30 V 调整脉冲宽度、保持脉冲宽度为 40 μs 调节 V_{CE} 为例,分别画出低频应力波信号的开通瞬间信号脉冲尖峰幅值与 V_{CE} 、脉冲宽度之间的拟合曲线,如图 10 所示。

表 2 不同 V_{CE} 下低频应力波信号特征参数

Table 2 Characteristic parameters of low frequency stress wave signals under different V_{CE}

V_{CE}/V	不同脉宽(μs)下开通瞬间信号脉冲尖峰幅值/mV					
	10	20	40	60	80	100
10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
15	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
20	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
25	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
30	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

注:特征参数频率范围均为 50~150 kHz(低频)

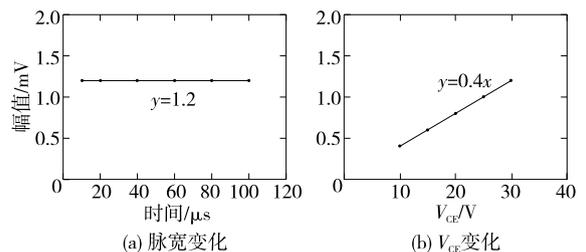


图 10 脉宽/ V_{CE} 变化与开通瞬间低频应力波信号幅值关系
Figure 10 Relationship between the change of pulse width/ V_{CE} and the amplitude of low frequency stress wave signal at the conducting moment

分别给出相同 V_{CE} (30 V) 不同脉冲宽度、不同 V_{CE} 相同脉冲宽度(40 μs) 2 种条件下所采集的应力波信号的时域波形和频谱图,对比结果分别如图 11、12 所示。

通过分析表 2 中数据、拟合关系曲线以及应力波信号的时域波形、频谱图,在不同 V_{CE} 下,改变脉冲宽度可以发现: V_{CE} 不变时改变脉冲宽度,开通时刻的应力波信号脉冲尖峰的幅值不变,低频机械应力波信号仍满足此规律;低频应力波信号主要集中在 50~150 kHz,脉冲宽度的改变对于机械应力波的频谱基本无影响,只是改变了时域波形的叠加时间,导致时域波形不一致;脉冲宽度相同时开通时刻的声发射信号脉冲尖峰幅值随着 V_{CE} 的增大而增大,并且呈线性增长,低频机械应力波信号仍满足此规律,同时, V_{CE} 的变化对应力波的时域波形的形状基本无影响,只是改变了信号的幅值;开通和关断都会产生声发射信号,开通时刻信号幅值为正,关断时信号幅值为负。

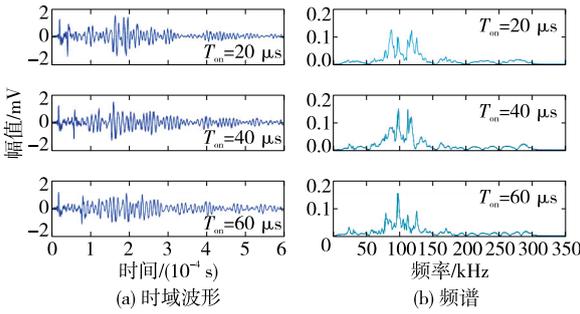


图 11 低通滤波后不同脉宽下的信号时域波形及频谱

Figure 11 Time-domain waveforms and spectrums of signals under different pulse widths after low-pass filtering

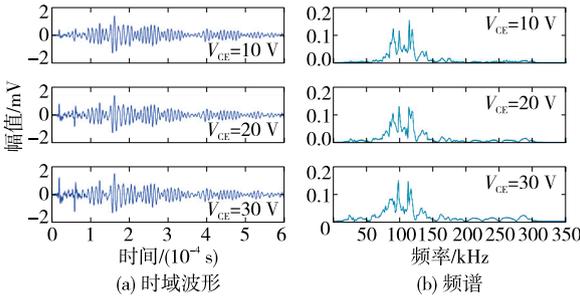


图 12 低通滤波后不同 V_{CE} 下的信号时域波形及频谱

Figure 12 Time-domain waveforms and spectrums of signals under different V_{CE} signals after low-pass filtering

3.3 应力波信号的高频成分分析

信号的高频部分虽然不在 20~450 kHz 内,但是高频部分在声发射传感器 VS45-H 中有较好的响应。针对状态 1, V_{CE} 设置为 0 V, 脉宽为 40 μs 下所提取应力波信号的时域波形和频谱如图 13 所示,同时,对不同脉冲宽度下的声发射信号进行频谱分析,可发现无明显脉冲尖峰并且无高频成分,由此可推出高频电磁波与 V_{CE} 有关。

针对状态 2、3,对试验设置 V_{GE} 为 15 V、真空封脂耦合剂耦合所采集到的应力波信号加一个高通数

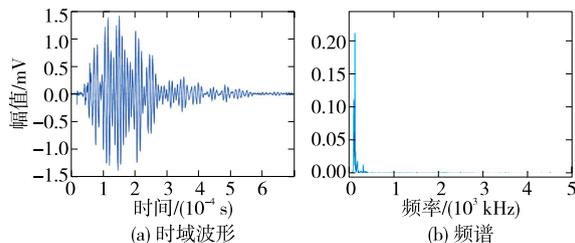


图 13 无 V_{CE} 时信号的时域波形及频谱

Figure 13 Time-domain waveform plots and spectrum of signals without V_{CE}

字滤波器,下限设置为 300 kHz,同样观察 IGBT 开通时刻应力波信号的脉冲尖峰幅值,并记录如表 3 所示。

表 3 不同 V_{CE} 下高频应力波信号特征参数

Table 3 Characteristic parameters of high frequency stress wave signals under different V_{CE}

V _{CE} /V	不同脉宽(μs)下开通瞬间信号脉冲尖峰幅值/mV					
	10	20	40	60	80	100
10	2.4	2.4	2.3	2.4	2.3	2.4
15	3.5	3.6	3.6	3.5	3.5	3.6
20	4.8	4.9	4.9	5.0	4.9	5.0
25	6.1	6.2	6.1	6.1	6.2	6.1
30	7.3	7.4	7.3	7.3	7.4	7.3

注:特征参数频率范围均为 2.7 MHz(高频)

根据表 3 中数据,以保持 V_{CE} 为 30 V、调整/保持脉冲宽度为 40 μs 不变调节 V_{CE} 为例,分别画出低频应力波信号的开通瞬间信号脉冲尖峰幅值与 V_{CE}/脉冲宽度之间的拟合曲线,如图 14 所示。

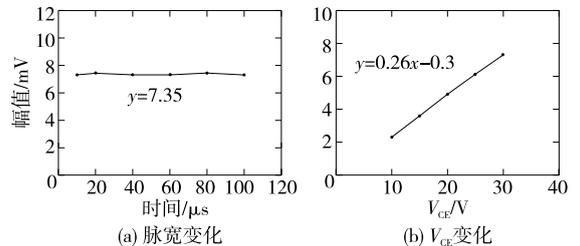


图 14 脉宽/V_{CE} 变化与开通瞬间高频应力波信号幅值关系

Figure 14 Relationship between the change of pulse width/V_{CE} and the amplitude of high frequency stress wave signal at the conducting moment

在其余条件保持不变的前提下,分别给出相同 V_{CE}(30 V) 不同脉冲宽度、不同 V_{CE} 相同脉冲宽度(40 μs) 2 种条件下所采集的应力波信号高频成分的时域波形和频谱,分别如图 15、16 所示。

通过分析表 3 中数据、拟合曲线以及应力波信号的时域波形和频谱图,高频信号的频率范围主要集中在 2.7 MHz 附近;同时在不同 V_{CE} 条件下,改变脉冲宽度可发现:V_{CE} 不变时改变脉冲宽度,开通时刻的高频应力波信号脉冲尖峰的幅值不变,并且频率点要密集一些;当脉冲宽度相同时,开通时刻的高频应力波信号脉冲尖峰幅值随着 V_{CE} 的增大而增大,并且呈线性增长。

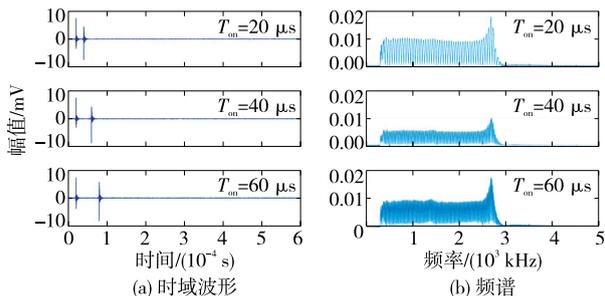


图 15 高通滤波后不同脉宽下的信号时域波形及频谱

Figure 15 Time-domain waveforms and spectrums of signals under different pulse widths after high-pass filtering

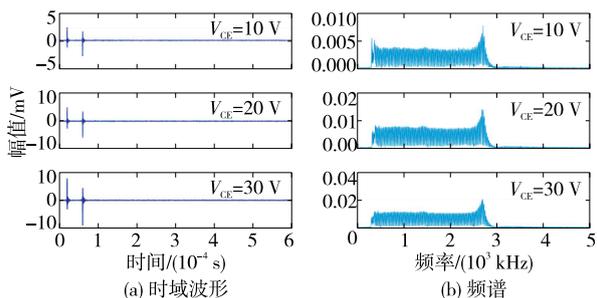


图 16 高通滤波后不同 V_{CE} 下的信号时域波形及频谱

Figure 16 Time-domain waveforms and spectrums of signals under different V_{CE} after high-pass filtering

4 结语

本文分析了 IGBT 在不同状态下应力波信号的产生机理,再通过搭建脉冲测试电路和声发射信号检测平台采集 IGBT 在不同的状态、不同传感器耦合方式下产生的应力波信号;并分析了应力波信号的组成成分,再通过数字滤波技术提取了高频和低频应力波信号时域和频域的特征参数,建立了特征参数与 IGBT 参数之间的关系。

1) IGBT 开通和关断都会产生应力波信号,开通时刻信号幅值为正,关断时信号幅值为负,信号主要集中在 $50 \sim 150$ kHz 和 2.7 MHz 附近,应力波信号由电磁波信号和低频应力波信号共同组成;

2) V_{CE} 不变时改变脉冲宽度,开通时刻的应力波信号脉冲尖峰的幅值不变,低频和低频信号成分也有相同特点,并且脉冲宽度的改变对于机械应力波的频谱范围基本无影响,只是改变了时域波形的叠加时间,导致时域波形不一致;

3) 脉宽相同时开通时刻的应力波信号脉冲尖峰幅值随着 V_{CE} 的增大而增大,并且呈线性增长,低频和低频信号成分也有相同特点,同时 V_{CE} 的变化对信号时域波形的形状基本无影响,只是改变了信号的幅值;

4) IGBT 在没有关断电流时也会有应力波信号产生,且高频信号成分与 V_{CE} 有关,同时发现有关断电流时,应力波信号的能量有明显的增大。

本文研究的 IGBT 在低压条件下不同状态时应力波信号的特征,产生的 AE 信号包含了大量的信息。AE 信号与 IGBT 电气参数之间的联系表明,该方法是一种潜在的监测功率器件状态的方法,尽管本文还没有探索所有的方法,但通过分析 IGBT 声发射信号的机理和对信号处理,最终得出基于声发射技术监测功率器件具有巨大潜力的结论。对于器件老化甚至失效与机械应力波之间的联系需要进一步讨论,在接下来的试验中会针对长时间老化或者制造失效条件来观测器件产生机械应力波的变化。本文为后续研究高压及老化状态奠定了基础,具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 焦石,严治勇,张健成,等.柔性直流输电功率模块的现场智能化检测[J].电网与清洁能源,2021,37(9):59-69+76. JIAO Shi, YAN Zhiyong, ZHANG Jiancheng, et al. Field intelligent test of flexible HVDC power module[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 59-69+76.
- [2] 王宁燕,许军,丁登伟,等.柔性直流输电工程中 MMC 模块内 IGBT 运行时暂态电压精确测量方法研究[J].高压电器,2021,57(9):26-33. WANG Ningyan, XU Jun, DING Dengwei, et al. Research on accurate measurement method of transient voltage of operated IGBT in MMC module in flexible HVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 26-33.
- [3] 蔡俊,陈程.一种车用 IGBT 开关过电压保护电路设计[J].电测与仪表,2021,58(4):60-65. CAI Jun, CHEN Cheng. Design of over-voltage protection circuit of IGBT switch for vehicle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 60-65.

- [4] 陈正雄,帕孜来·马合木提,沈玮.基于改进支持向量回归的IGBT老化预测[J].中国电力,2022,55(7):1-10.
CHEN Zhengxiong, PAZILAI Mahemuti, SHEN Wei. Aging prediction of IGBT based on improved support vector regression[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 1-10.
- [5] 张成明,陈德志,赵文良.基于IGBT选型的整流器、逆变器损耗计算新方法研究[J].智慧电力,2022,50(4):81-88+116.
ZHANG Chengming, CHEN Dezhi, ZHAO Wenliang. New loss calculation method of rectifier and inverter based on IGBT selection[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 81-88+116.
- [6] 姚芳,胡洋,李铮,等.基于结温监测的风电IGBT热安全性和寿命耗损研究[J].电工技术学报,2018,33(9):98-107.
YAO Fang, HU Yang, LI Zheng, et al. Study on thermal safety and lifetime consumption of IGBT in wind power converters based on junction temperature monitoring [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 98-107.
- [7] 龙云波,张曦,徐永海,等.不平衡电压下IGBT串联STATCOM稳定运行范围确定及应用[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):158-166.
LONG Yunbo, ZHANG Xi, XU Yonghai, et al. Determination and application of stable operation range of series-connected STATCOM with IGBT under unbalance voltage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 158-166.
- [8] 彭英舟,周维维,张晏铭,等.基于键合线等效电阻的IGBT模块老化失效研究[J].电工技术学报,2017(20):117-123.
PENG Yingzhou, ZHOU Luwei, ZHANG Yanming. Study of IGBT module aging failure base on bond wire equivalent resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017(20): 117-123.
- [9] 王学梅,张波,吴海平.基于失效物理的功率器件疲劳失效机理[J].电工技术学报,2019,34(4):85-95.
WANG Xuemei, ZHANG Bo, WU Haiping. A review of fatigue mechanism of power devices based on physics-of-failure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 85-95.
- [10] MOROZUMI A, YAMADA K, MIYASAKA T, et al. Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3): 665-671.
- [11] ZHU Y, MA K, CAI X. Thermal characterization method of power semiconductors based on H-bridge testing circuit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8268-8273.
- [12] KARKKAINEN T J, TALVITIE J P, KUISMA M, et al. Acoustic emission in power semiconductor modules—first observations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6081-6086.
- [13] KÄRKKÄINEN T J, TALVITIE J P, IKONEN O, et al. Sounds from semiconductors—acoustic emission experiment with a power module[C]//IEEE 16th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe, Lappeenranta, Finland, 2014.
- [14] KARKKAINEN T J, TALVITIE J P, KUISMA M, et al. Acoustic emission caused by the failure of a power transistor[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC, Charlotte, NC, United States, 2015.
- [15] MULLER S, DRECHSLER C, HEINKEL U, et al. Acoustic emission for state-of-health determination in power modules[C]// IEEE 13th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), Leipzig, Germany, 2016.
- [16] 李孟川,孟志强,胡毅,等.电力电子器件机械应力波的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(4):74-79.
LI Mengchuan, MENG Zhiqiang, HU Yi. Experimental study of mechanical stress wave in power electronics device[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(4): 74-79.
- [17] DAVARI O K P, ANNUZZO F. Investigation of acoustic emission as a non-invasive method for detection of power semiconductor aging[J]. Microelectronics Reliability, 2018, (88-90): 545-549.
- [18] LI M C, HE Y Z, MENG Z Q, et al. Acoustic emission based experimental analysis of mechanical stress wave in IGBT device[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 6064-6074.