

Influence of Uneven Pressure Distribution on Current Distribution in Paralleled Multi-Chips Press Pack IGBT

Zhenyu Deng¹, Minyou Chen¹, Wei Lai¹, Hui Li¹, Xiao Wang¹, Jinyuan Li², Yaoting Du³

¹State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

²State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing

³State Grid Chongqing Nan'an Power Supply Company, Chongqing
Email: laiweicqu@126.com

Received: Apr. 23rd, 2020; accepted: May 8th, 2020; published: May 15th, 2020

Abstract

As a core component of the flexible HVDC equipment, the press pack IGBT device has uneven pressure distribution within the device due to factors such as manufacturing process and device aging at a long-time operation, which results in uneven current distribution among the paralleled sub-modules. This reduces the reliability of some sub-modules and accelerates them aging speed. In order to study the relationship between the pressure difference in the press pack IGBT and the degree of current imbalance, this paper analyzes the reason for the uneven current of the paralleled modules caused by the uneven pressure distribution. From the experiment under different pressure differences, data of current distribution data was collected. The relationship between the difference in pressure and the difference in current distribution is clarified through the analysis of the experimental results, which provides a reference for design optimization and exploring the evolution of aging failure in press pack IGBTs.

Keywords

Press Pack IGBTs, Uneven Pressure, Uneven Current Sharing, Current Distribution

多芯片并联压接式IGBT中压力不均对电流分布的影响分析

邓真宇¹, 陈民铀¹, 赖伟¹, 李辉¹, 王晓¹, 李金元², 杜耀婷³

¹重庆大学, 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

文章引用: 邓真宇, 陈民铀, 赖伟, 李辉, 王晓, 李金元, 杜耀婷. 多芯片并联压接式IGBT中压力不均对电流分布的影响分析[J]. 智能电网, 2020, 10(3): 67-73. DOI: 10.12677/sg.2020.103008

²全球能源互联网研究院, 北京

³国网重庆市电力公司南岸供电分公司, 重庆

Email: laiweicqu@126.com

收稿日期: 2020年4月23日; 录用日期: 2020年5月8日; 发布日期: 2020年5月15日

摘要

压接式IGBT器件作为柔直输电换流装备的核心元件, 在长时间尺度下因制造工艺、器件老化等因素, 器件内部出现压力分布不均的现象, 进而造成并联子模块间电流分布不均, 使部分子模块可靠性降低, 老化加快。为研究压接式IGBT中压力差异与电流分布不均匀程度间的关系, 本文分析了压力分布导致器件内部模块并联不均流的原因; 并开展不同压力差异下的并联实验, 获得了不同压力差异下的电流分布数据。通过对实验结果的分析, 明确了压力差异与电流分布差异之间的关系, 为探究压接式IGBT的优化设计及老化失效演变提供参考。

关键词

压接式IGBT, 压力不均, 并联不均流, 电流分布

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柔性直流输电技术在远距离电力传输中的应用越来越广泛, 在大规模可再生能源并网、多端能源网络等方面具有广阔的发展前景。压接式IGBT器件(Press Pack IGBT, PPI)是柔性直换流电流阀装备中的核心元件, 其可靠性对系统的稳定运行极其重要[1] [2] [3]。压接式IGBT器件内部由多个子模块并联而成, 空间结构复杂, 由于制造工艺、封装技术、器件老化等因素, 器件内部存在压力不均的现象。压力分布的不均导致内部并联子模块间的电流分布不均, 部分子模块承受的电流超过额定电流, 进而造成其可靠性降低、失效概率增加、老化程度加快等一系列问题。因此, 研究多芯片并联压接式IGBT内部压力不均程度与电流不均程度间的耦合关系, 有助于发现器件的老化失效过程中的力-电特性变化规律, 为器件的状态监测和故障诊断提供参考。

文献[4] [5]分别研究了封装寄生参数和外部汇流母排对压接式IGBT中并联子模块间的动态不均流的影响, 对压接式IGBT器件内部结构的设计和优化提出了参考意见。文献[6]研究了压力不均对多芯片压接式IGBT内部温度分布和电流分布的影响, 指出了压力的不均会造成温度分布不均和电流分布不均, 但并未指出压力不均与温度分布和电流分布之间的关系。针对多芯片并联压接式IGBT中的不均流现象, 现有研究多集中在寄生参数和器件结构等方面; 压力差异造成的电流分布不均问题仅有现象认知, 压力差异与不均流程度间的量化关系尚不明确。综上所述, 研究多芯片并联的压接式IGBT器件中压力分布与电流分布的关系, 能够帮助了解器件的失效过程, 探究器件的薄弱环节, 为器件的设计和优化提供参考, 进而提高压接式IGBT器件的可靠性。

针对多芯片并联的压接式IGBT模块内部压力分布不均的情况, 本文分析了压力不均造成电流分配

不均的原因，并通过实验探究了不同压力差异情况下的电流分布情况，量化了压力分布与电流分布之间的关系。

2. 压力不均导致不均流的原因分析

在压接式 IGBT 中，每个子模块均由多层组件堆叠而成，通过外部施加压力使各层之间形成电、热连接，在各层的接触面形成接触电阻和接触热阻。如图 1 所示，图 1(a)为压接式 IGBT 子模块的截面图，图 1(b)为集电极与发射极之间的等效电阻。

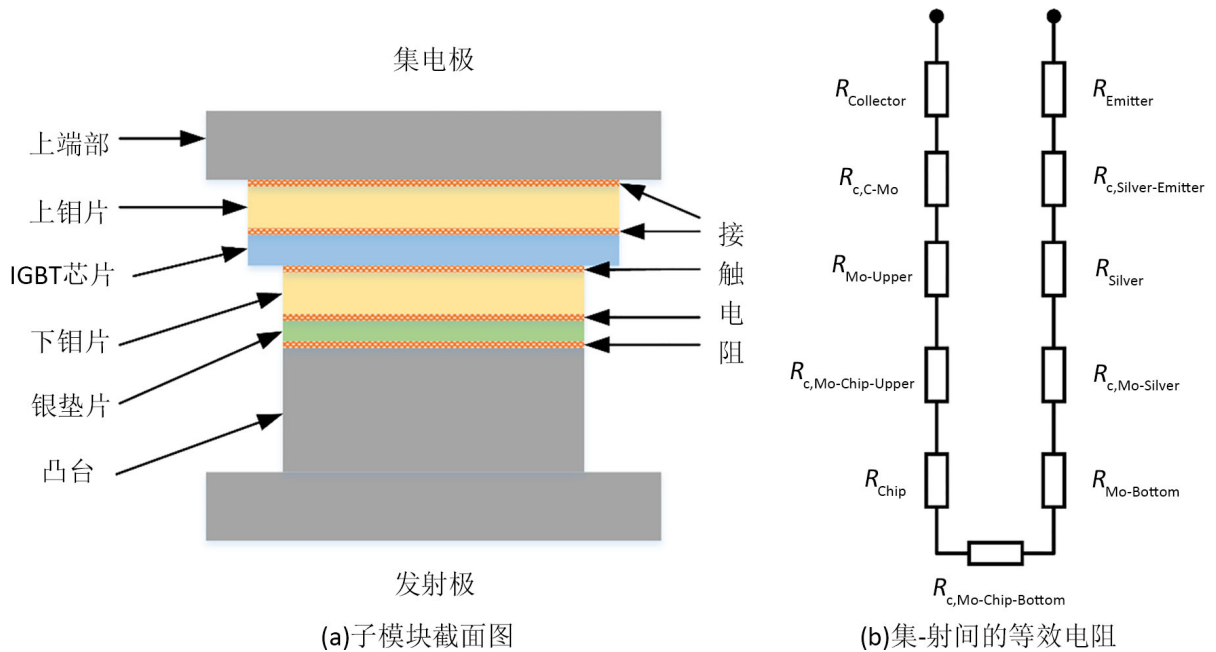


Figure 1. Cross section of press-pack IGBT and its equivalent on-resistance
图 1. 单芯片压接式 IGBT 模块截面图及等效导电电阻

通过压力进行连接的各层金属的表面并非光滑的，各层组件间的接触并非整个平面，而是在有限的区域内。各层组件间的接触电导率均随着压力 F 的增加而上升[7]，并且在压接封装器件的等效电路中，只有接触电阻与压力有关[8]，其关系可以表示为[9]：

$$R_{ECC} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (1)$$

上式中， ρ_1 、 ρ_2 为形成接触面的两种材料各自的电阻率； H 为两种接触材料中较软材料的硬度， F 为施加在器件上的压力大小。

因为压力仅对接触电阻造成影响，可令：

$$\begin{aligned} R_{ECC,total} &= R_{c,C-Mo} + R_{c,Mo-Chip-Upper} + R_{c,Mo-Chip-Bottom} + R_{c,Mo-Silver} + R_{c,Silver-Emmitter} \\ R_{Layers} &= R_{Collector} + R_{Mo-Upper} + R_{Chip} + R_{Mo-Bottom} + R_{Silver} + R_{Emitter} \end{aligned} \quad (2)$$

则子模块的等效导电电阻 R_{CE} 可表示为：

$$R_{CE} = R_{ECC,total} + R_{Layers} \quad (3)$$

对于两个并联的压接式 IGBT 模块，令总电流为 I_C ，并联器件中的电流分别为： I_{C1} 和 I_{C2} ，则器件之间的电流差 ΔI 为：

$$\Delta I = \frac{|R_{CE1} - R_{CE2}|}{R_{CE1} + R_{CE2}} \cdot I_C = \frac{\left| (R_{ECC,total1} + R_{Layers1}) - (R_{ECC,total2} + R_{Layers2}) \right|}{R_{ECC,total1} + R_{Layers1} + R_{ECC,total2} + R_{Layers2}} \cdot I_C \quad (4)$$

要避免并联压接式 IGBT 器件子模块之间存在静态电流差, 则应尽可能保证每个子模块的 IGBT 芯片、铜片、银垫片等组件具有一致的特性。通常在器件的生产制造过程中对组件进行筛选, 减小组件特性的差异, 即可以认为 $R_{Layers1} \approx R_{Layers2}$, 上式可改写为:

$$\Delta I = \frac{|R_{ECC,total1}(F_1) - R_{ECC,total2}(F_2)|}{R_{ECC,total1}(F_1) + R_{Layers1} + R_{ECC,total2}(F_2) + R_{Layers2}} \cdot I_C \quad (5)$$

结合公式(1)和(5)可知, 当 $F_1 = F_2$ 时, 并联的两个器件之间不存在通态电流差; 当 $F_1 \neq F_2$ 时, 则并联的两个器件之间会产生通态电流差, 且 F_1 与 F_2 之间的差异越大, 造成的通态电流差也越大。

多芯片并联的压接式 IGBT 器件在长时间尺度的运行中, 由于制造工艺、温度分布不均、老化程度不均等因素, 导致压接式 IGBT 器件内部存在压力分布不均的现象, 造成并联的子模块间产生电流的不均匀分布。

3. 不同压力差异下的不均流程度实验及分析

用于实验的测试电路原理图和测试电路板如图 2 所示。信号发生器产生的控制信号通过同轴电缆传送到驱动板, 驱动板向两个待测器件输出驱动电压, 控制 IGBT 的开通和关断。本实验中设定开通电压为 16 V, 关断电压为 -4 V。采用负压关断, 可以减小寄生参数造成的振荡, 加快关断速度。可编程电源的输出电压, 接入电路板后与板上的高压大容量形成并联, 为实验提供稳定的电压。通过电路板, 将双脉冲实验中的上桥臂和下桥臂连接起来, 并分置在电路板的两端, 避免了电路接线复杂, 增加了接线的灵活性。同时也有利于减小导线间的互感作用对实验的影响。

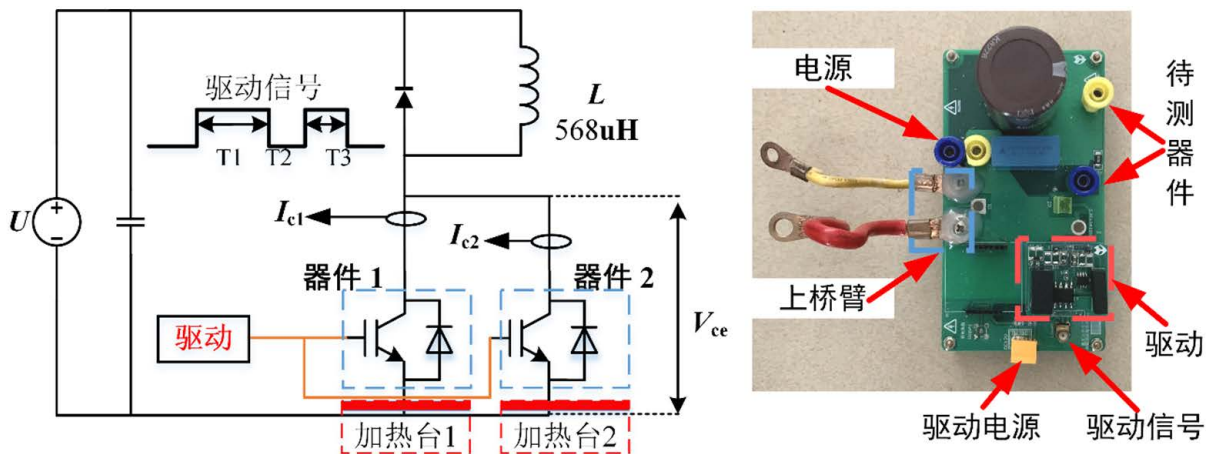


Figure 2. Schematic diagram of the equivalent experiment circuit and board for test
图 2. 测试电路及电路板

3.1. 压力差异对不均流程度的影响

采用两个单芯片压接式 IGBT 器件并联, 保持器件结温相等, 并给两个器件分别施加不同大小的压力值, 使得两个器件的压力存在差值, 模拟多芯片并联压接式 IGBT 模块内部的压力不均现象。采用搭建的实验平台, 测量两个器件在不同的压力差值下的通态电流, 计算两个器件上流过电流的差值。当器件的结温均为 50°C 时, 不同压力下的测量结果如表 1 所示。

Table 1. Current imbalance under different pressure
表 1. 不同压力下的通态电流差

组序号	压力值/N		通态电流差/A			
	器件 1	器件 2	25 A	50 A	75 A	100 A
1	1200	1200	0.031	0.495	0.665	0.866
2	1600	1200	0.499	1.195	1.973	3.197
3	2200	1200	0.763	1.860	2.883	4.748
4	500	1200	0.858	1.892	1.874	2.993
5	500	2200	1.438	3.266	4.553	6.827

实验测量了 5 组压力情况下, 两个器件在 4 个不同总电流等级下的电流差值。从表 1 可以看出, 当器件 1 和器件 2 的压力均为 1200 N 时, 两个器件间存在着微小的电流差异。造成该差异的原因可能是并联芯片间的输出特性存在轻微差异或线路杂散电感的影响, 该差异量较小, 不会对实验结果产生明显影响。由 1~3 组实验可知, 当器件 2 压力保持为 1200 N, 器件 1 的压力从 1200 N 增加为 1600 N 和 2200 N 时, 在不同的电流等级下, 两个器件间的通态电流差均随着施加在器件 1 上的压力的增加而增大。将器件 2 的压力值作为参量, 则两个器件间的压力差导致的通态电流差的曲线如图 3 所示。

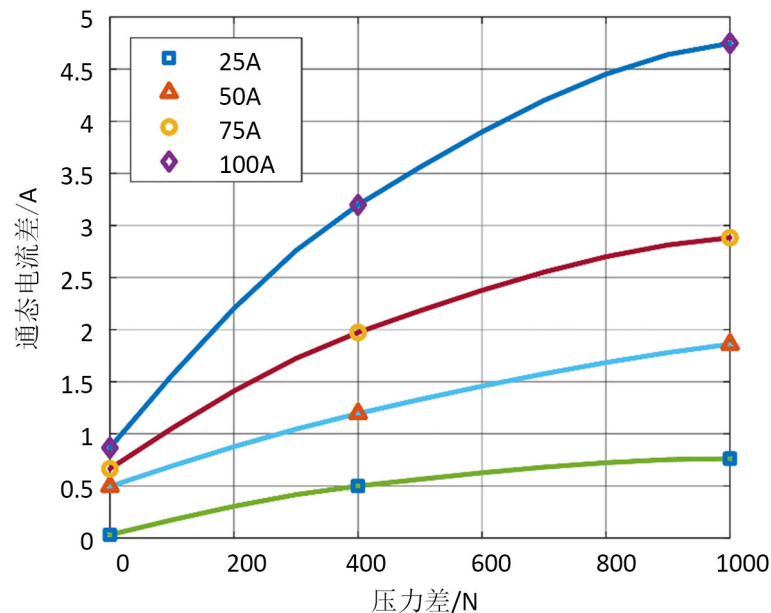


Figure 3. Current imbalance under different pressure difference
图 3. 不同压力下的通态电流差

从图 3 中可以看出, 在器件 2 压力保持恒定时, 器件 1 与器件 2 压力差增大(器件 1 上的压力不小于器件 2 上的压力), 器件间的通态不均流现象加剧, 电流差与压力差近似表现为指数关系。压力的增大, 使不同组件间的接触面积增加, 粗糙度减小, 接触电阻减小。当压力差从 0 N 增加到 400 N 时, 不同电流等级下的通态电流差增量分别为 0.468 A (25 A)、0.700 A (50 A)、1.308 A (75 A) 和 2.331 A (100 A)。当器件间的压力差从 400 N 增加到 1000 N 时, 对应的通态电流差增量分别为 0.264 A、0.665 A、0.910 A 和 1.511 A。可见, 压力差值增加了 1.5 倍, 但通态电流差增量变为了 0.7 倍; 即随着压力差的增大, 通态电流差的增量在下降。造成该结果的原因是, 随着压力的增加, 接触面粗糙度变化趋势减小, 导通电阻

的变化量逐渐减小,当压力增加到一定值后,导通电阻的大小几乎保持不变。

当器件 1 的压力值保持为 500 N 时,从表 1 可知,两个器件中的电流差值随着施加在器件 2 上的压力增加而增大。当器件 2 上的压力为 1200 N 时(组序号 4),系统电流等级为 75 A 和 100 A 时,两个器件之间的通态电流差(1.874 A 和 2.993 A)与第 2 组条件下测得的通态电流差值(1.973 A 和 3.197 A)非常接近。选择器件 2 承受的压力值(1200 N)作为参考值,两个器件上的压力差分别为+400 N 和-700 N,但在并联器件之间造成的通态不均流程度几乎相等。由此可知,不同压力差异情况下的电流不均匀程度可能相等;并且在参考压力点两侧相同压力差异造成的不均流程度变化不等,低于参考点的压力变化对不均流程度的影响比高于参考点的压力变化造成的影响更显著。造成该现象的原因是,在 500 N 到 1200 N 的区间范围内,压力对接触电阻的影响显著,接触电阻大小随压力增大下降明显;当器件承受压力大于 1200 N 后,压力变化对接触电阻造成的影响明显降低。因此,在研究压力不均造成的电流不均时需要考虑具体的压力分布情况,不可以压力的绝对差值来估算或比较器件间的电流分布不均匀程度。

3.2. 温度差异对压力造成的不均流程度的影响

由于压接式 IGBT 器件运行中会产生热损耗,可能造成压接 IGBT 器件内部温度分布不均,进而不同子模块出现不同程度的热膨胀,导致压力发生变化。

为探究温度差异对压力造成的影响,选择表 1 中的 1~3 组压力条件,设置总电流为 100 A,对器件 2 进行加热,使并联的两个器件之间参数温度差异。温度差异为 50℃时,不同压力分布下,电流差异相对于不存在温度差异的时的电流差异增量如表 2 所示:

Table 2. Relative change of current imbalance in different pressure distribution
表 2. 不同压力下通态电流差的相对变化量

组序号	器件 1 压力/N	器件 2 压力/N	压力差/N	电流差相对增量/A
1	1200	1200	0	9.616
2	1600	1200	400	10.397
3	2200	1200	1000	10.273

表 2 以不同压力情况下无结温差异时的电流差作为参照量,计算了不同压力情况下结温差异增加到 50℃时电流差的增加量。由表可知,压力差异为 400 N 和 1000 N 电流差的相对增量与无压力差异时的电流增量的差异分别为: 0.781 A 和 0.657 A,即存在初始压力差异与不存在初始压力差异的情况下,当温度差异相同时,电流差异的变化量差异较小,温度的变化并未使初始压力差异带来的不均流程度发生明显变化。

综上,当参考相同时,压接式 IGBT 中的不均流程度随压力的增大而加剧。压力差异造成的不均流程度,在一定温度差异范围内,温度变化不会对其产生显著影响。在制造器件时,合理的设定压力值,有利于降低器件运行中压力因其他因素造成变化而导致的不均流程度。

4. 总结

压接式 IGBT 器件的可靠性影响着电流系统的可靠与稳定运行,本文针对压接式 IGBT 中的电流分布不均问题进行了研究分析,通过实验探究了不同压力差异情况下的电流分布特性,得到了以下结论:

- 1) 压力的不均通过改变压接式 IGBT 的接触面粗糙度,导致器件内部不同模块的接触电阻产生差异,进而导致器件内部产生的不均流现象。
- 2) 当选择小压力值最小的子模块作为参照时,内部并联子模块间的压力差异越大,模块间的不均流

程度越严重, 电流差异随压力差异表现为指数关系; 并且随着压力差异的增大, 电流差异的相对增量逐渐减小。压力参考值为 1200 N 时, 压力差异绝对值在参考值两侧变化对不均流程度的影响效果不同。

3) 不同的压力分布情况下, 不同的压力差异造成的不均流程度可能相似; 即在分析压力对电流分布的影响时, 需要固定压力的参考点, 不可仅凭压力大小差异来判断或估计压接式 IGBT 器件中的不均流程度。

4) 在一定温度范围内, 压接式 IGBT 内部温度分布的变化, 不会造成由压力差异导致的不均流程度发生明显变化。

基金项目

国家自然科学基金项目(51707024); 国家自然科学基金-国家电网公司联合基金重点项目(U1966213)。

参考文献

- [1] 段雯娟. 中美新气候行动令人鼓舞[J]. 地球, 2015(11): 44-46.
- [2] 胡航海, 李敬如, 杨卫红, 李红军. 柔性直流输电技术的发展与展望[J]. 电力建设, 2011, 32(5): 62-66.
- [3] 中国能源研究会. 中国能源发展报告 2018 [J]. 中国电业, 2018(10): 2.
- [4] Mo, S., Zhao, Z., Sun, P., Lu, Y. and Tang, X. (2017) Influence of Package Parasitic Inductance on Transient Current Distribution Characteristics of Press Pack IGBT. 2017 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, 16-19 October 2017, 1-3. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420381>
- [5] 顾妙松, 崔翔, 彭程, 唐新灵, 杨艺烜, 李学宝, 赵志斌. 外部汇流母排对压接型 IGBT 器件内部多芯片并联均流特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 234-245+390.
- [6] Wei, L., Li, H., Chen, M., et al. (2019) Investigation on the Effects of Unbalanced Clamping Force on Multi-chip Press Pack IGBT Modules. *IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics*, 7, 2314-2322. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2876768>
- [7] Poller, T., Lutz, J., D'Arco, S., et al. (2013) Determination of the Thermal and Electrical Contact Resistance in Press-Pack IGBTs. 2013 IEEE 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, 2-6 September 2013, 1-9. <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6634440>
- [8] Ortiz Gonzalez, J., Alatisse, O., Aliyu, A., et al. (2017) Evaluation of SiC Schottky Diodes Using Pressure Contacts. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64, 8213-8223. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2677348>
- [9] Rajaguru, P., Lu, H., Bailey, C., et al. (2015) Electro-Thermo-Mechanical Modelling and Analysis of the Press Pack Diode in Power Electronics. *IEEE International Workshop on Thermal Investigations of Ics & Systems*, Paris, 30 September-2 October 2015, 1-6. <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2015.7389607>