Application Note AN 2012-11
V1.0 Nov. 2012

基于 TRENCHSTOP™ 5 技术工业应用的高速 IGBT

IFAT IPC APS AE
Forrest Zheng
Giulia Seri
Davide Chiola

出版日期：２０１２年０９月０２日
英飞凌科技出版 奥地利 AG
9500 维拉赫, 奥地利
© 2012 英飞凌科技 AG.
保留所有权利

注意！
本应用手册给出的信息不能被视为一定条件或特定条件的保证。对于本文任何例子或给出的提示，任何典型值，和或任何有关器件的应用信息，英飞凌科技在此声明，未就本文中给出的任何及所有信息作出任何性质的保证，也不承担任何性质的责任，包括但不限于没有侵犯任何第三方的知识产权的保证。

信息查询
若需获得关于技术、交付条款和价格的更多信息，敬请联系距离您最近的英飞凌办事处
（www.infineon.com）

为方便客户浏览，英飞凌以下所提供的将是有关英飞凌产品及服务资料的中文翻译版本。该中文翻译版本仅供参考，并不可作为任何论点之依据。虽然我们尽力提供与英文版本含义一样清楚的中文翻译版本，但因语言翻译和转换过程中的差异，可能存在不尽相同之处。因此，我们同时提供该中文翻译版本的英文版本供您阅读，请参见【Application Note IGBT 650V TRENCHSTOP™ 5】。
并且，我们在此提醒客户，针对同样的英飞凌产品及服务，我们提供更加丰富和详细的英文资料可供客户参考使用。请详见【IGBT without Anti-Parallel Diode】

客户理解并且同意，英飞凌毋须为任何人士由于其在翻译原来的英文版本成为该等中文翻译版本的过程中可能存在的任何不完整或者不准确而产生的全部或者部分、任何直接或者间接损失或损害负责。英飞凌对于中文翻译版本之完整与正确性不担负任何责任。英文版本与中文翻译版本之间若有任何歧异，以英文版本为准，且仅认可英文版本为正式文件。

您如果使用以下提供的资料，则说明您同意并将遵循上述说明。如果您不同意上述说明，请不要使用本资料。

信息查询
若需获得关于技术、交付条款和价格的更多信息，敬请联系距离您最近的英飞凌办事处
（www.infineon.com）

警告

由于技术要求，组件可能包含有害物质。若需了解相关物质的类型，请联系距离您最近的英飞凌办事处。如果可以合理地预计英飞凌的某个组件失效可能会导致生命支持设备或系统失效，或者影响该等设备或系统的安全性或有效性，那么在将这些组件用于生命支持设备或系统之前，必须获得英飞凌的明确书面同意。生命支持设备或系统意指用于植入人体内部，或者支持和/或维持、维系和/或保护人类生命的设备或系统。如果这些设备或系统失效，可以合理推定其用户或其他人的健康将受到威胁。

AN2012-11

修定记录：2012.9， V1.0

之前版本：无

主题内容：TRENCHSTOP™ 5

作者：Forrest Zheng, Giulia Seri, Davide Chiola IFAT IPC APS AE

请提意见

如果您觉得本文档中涉及信息有错、不清楚或者有遗漏的，请把您的意见发到[Forrest.Zheng@infineon.com]。您的反馈意见将有助于我们不断提高文档质量。

目录

1 简介 5

2 技术与产品系列概述 5

2.1 TRENCHSTOPTM 5 的静态与动态特性 6

2.1.1 与前一代产品对比 7

2.1.2 动态特性 9

3 工业应用时的性能测量-太阳能逆变器的逆变环节 11

3.1 损耗计算 11

3.2 双极性 H 桥测试平台 14

4 总结 17

5 参考文献 17

1 简介

为提高变换器功率密度，在过去提出了采用快速 IGBT 代替传统结构或者超级结的 MOSFET。但是，由于技术的不足，快速 IGBT 仍然不适用于要求技术和成本都要有优势的一些领域。

新的 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 克服了这些技术不足，为高开关频率，如太阳能光伏逆变器、不间断电源（UPS）、弧焊机上等一些应用场合提供了一种引人关注的解决方法。

本应用手册的目的是为工程师们提供在采用传统 IGBT 的应用场合如何设计使用新的 TRENCHSTOP™ 5 的信息和建议。

在简介该新技术后，通过在一个双极性 H 桥太阳能光伏逆变器应用测试，给出更多详细的技术特点。

2 技术与产品系列概述

TRENCHSTOP™ 5 技术是对英飞凌 TRENCHSTOP™ 技术优化得到的，TRENCHSTOP™ 综合采用了沟道栅与场截止结构。为了使总损耗最小，该器件厚度减小到 50um，这就要求对载流子进行优化以减少漂移区的电荷载流子，这些电荷在关断期间需要从漂移区驱除的。这个两个措施可以显著减小通态损耗（饱和导通电压 Vcesat）和关断开关损耗（Eoff）。

此外，由于有一个新的“晶体管条形”（transistor stripe）单元结构，栅极电荷 Qg 减小，同时也使 MOS 沟道的宽度有很大的提高，如图 1 所示。

综合采用新的晶体管条形”（transistor stripe）单元和垂直结构使得即使在电流密度增加下，IGBT 有更低的饱和电压 Vcesat 和关断损耗 Eoff。

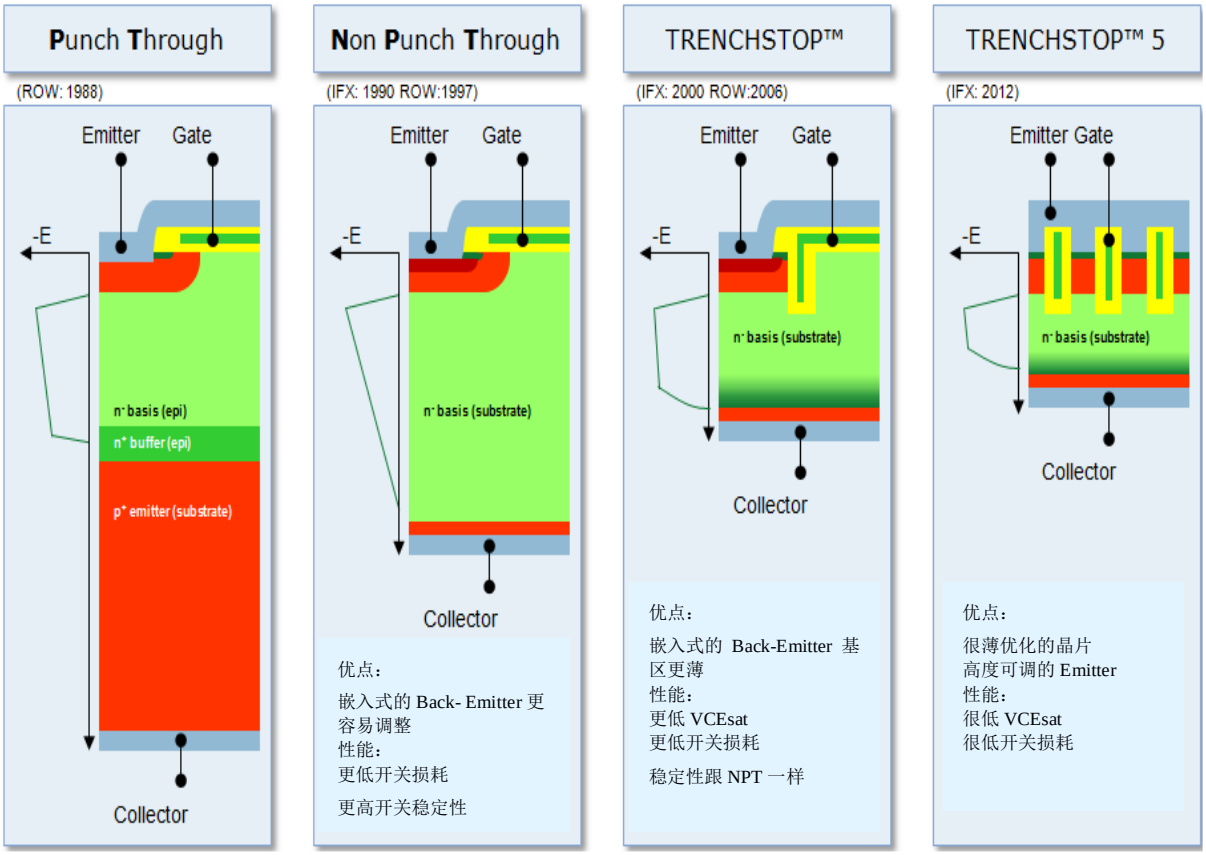

图 1 英飞凌 IGBT 结构演变图

尽管晶片厚度减小了，但可以使耐压值达到 650V，比之前系列产品提高了 50V。

TRENCHSTOP™ 5 推出两种不同系列以满足不同应用场合和不同设计人员的要求。

设计人员可选择系列有 H5 和 F5 两种。H5 系列的特点是优化了场截止技术的设计，目的是作为英飞凌 HighSpeed 3(HS3) IGBT 系列产品在标准应用场合的补充产品，它允许即插即用替换 IGBT，而不需要对电路板做任何调整设计。在关断时即使采用低值 Rg 和很高的电流变化率，它的关断电压上升也很软。

此外，F5 是一种更高性能的解决办法。它有更高的效率，但需要通过更高要求的设计才能获得。驱动级设计应该采用不同的 Rg on 和 Rgoff 门极电阻，来尽可能提高效率以及控制关断时的过电压。它最适合应用在换流回路和封装的杂散电感都很低的经过优化设计的电路板。

2.1 TRENCHSTOPTM 5 的静态与动态特性

本小节将对比介绍新的 TRENCHSTOP™ 5 两种系列产品与英飞凌 HighSpeed 3 系列产品之间的不同，对比内容包括静态和动态特性两方面。

2.1.1 与前一代产品对比

如表 1 所示，与 HighSpeed 3 系列产品比较，TRENCHSTOP™ 5 系列在所有的静态与动态参数上都有很大的提升。新产品耐压值提高了 50V，饱和通态电压 Vcesat 降低了 250mV，Coss、Cres 和 Qg 大大减小，关断时电流的上升沿和下降沿更快，以及导通损耗 Eon 和关断损耗 Eoff 降低了一半。

器件开关损耗减小意味着开关时速度更快。这也是为什么器件耐压要提高到 650V 的原因之一，特别是对于 F5，耐压提高可以为采用低栅极电阻关断大电流时引起的电压尖峰提供更多的电压裕量。提高器件耐压也有利于在太阳能光伏逆变器中的应用，因为太阳能电池板在开路时电压可能高达 580V，在一些特殊场合甚至高达 600V。在这种情况下，650V 的耐压提供了充分裕量。

如图 2 所示，TRENCHSTOP™ 5 使饱和电压 Vcesat 与关断损耗 Eoff 达到一个更高的折中水平，从而使其在工作时导通损耗与开关损耗的性能都得到提高。

表 1 TRENCHSTOP™ 5 与 HS3 的参数比较

		IKx40N60H3	IKx40N65F5	IKx40N65H5	Unit
Static Char.	$V_{CE(sat)}$ Typ@40A, U_g=15V, T_c=25°C	1,95	1,7	1,75	V
	$V_{CE(sat)}$ Typ@40A, U_g=15V, T_c=175°C	2,4	2,1	2,15	V
	DC collector current, T_c=25°C	80	80	80	A
	DC collector current, T_c=100°C	40	40	40	A
	G_{fs}@V_{ce}=20V, I_c=40A	24	50	50	S
	V_{geth}@0,4mA, V_{ce}=V_{ge}	5,1	4,0	4,0	V
	$V_{(br)ces}$, V_{ge}=0V, I_c=2mA	600	650	650	V
Cap. & Charges	C_{ies}@V_{CE}=25V, f=1MHz	2190	2100	2100	pF
	C_{oes}@V_{CE}=25V, f=1MHz	112	43	47	pF
	C_{res}@V_{CE}=25V, f=1MHz	64	9	9	pF
	Q_g@V_{cc}=480V, I_c=40A, V_{ge}=15V	223	84	90	nC
Switching @ 25°C **Ls=45nH/Cs=40pF**	$t_{d(on)}$@V_{cc}=400V, I_c=20A	19	21	21	Ns
	t_r@V_{cc}=400V, I_c=20A	33	10	11	Ns
	$t_{d(off)}$@V_{cc}0400V, I_c=20A	197	140	140	Ns
	t_f@V_{cc}=400V, I_c=20A	21	8	8	Ns
	E_{on}@V_{cc}=400V, I_c=20A	0,61	0,3	0,27	mJ
	E_{off}@V_cc=400V, I_c=20A	0,29	0,13	0,16	mJ

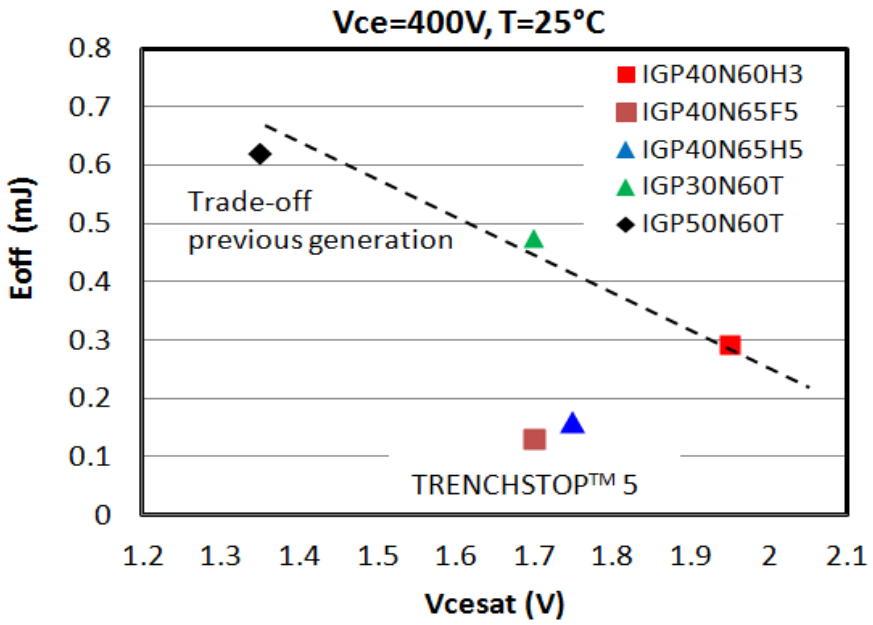

图 2　与以前各代产品对比的 Vcesat-Eoff 折中图

2.1.2　动态特性

为了完整评估该新技术，评估开关特性与 Rg 的关系是很重要的。图 3 左边的图为在一个标准双脉冲测试电路中时关断特性随 Rg 变化情况，换流回路中的杂散电感为 45nH。与传统的高速 IGBT 比较，H5 与 F5 的关断能量 Eoff 曲线大大降低，其与采用 5Ohm 低栅极电阻时的超级结 MOSFET 差不多。

图 3 右边的图是关断时集射结电压两端电压随 Rg 变化的情况。图中曲线再次说明了 H5 与 F5 系列产品的差异，因此这两个不同系列的产品都是需要的。H5 系列关断时的特性比较平滑，它的关断电压尖峰跟 H3 系列的相同。F5 系列的特点是关断时电压尖峰更高，但有更高的效率。图 4 为关断时的典型波形，从图 4 可以看到 F5 系列在关断时，电流下降更快，这说明 F5 系列不可避免存在更高的过电压（L di/dt）。

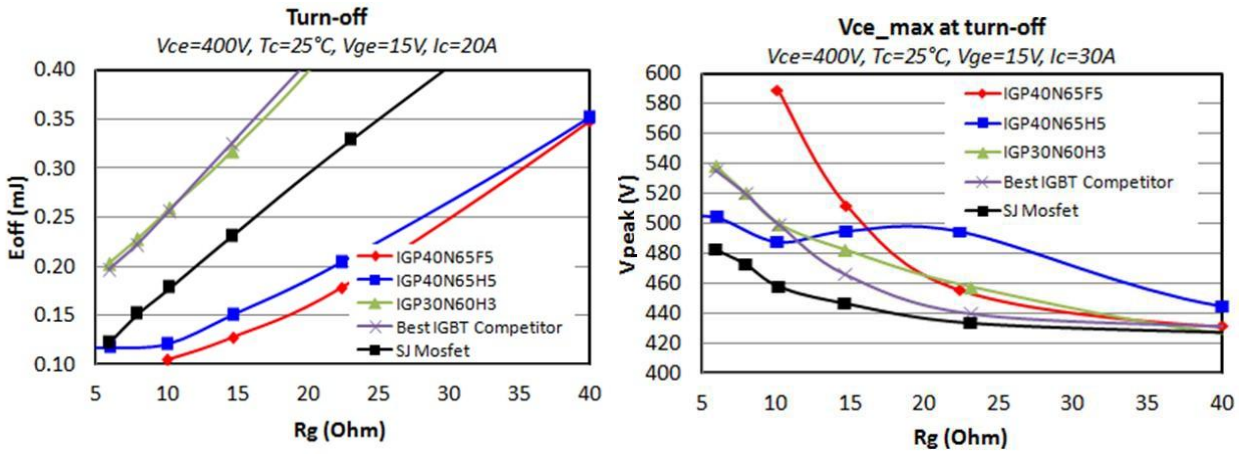

图 3 关断特性与栅极电阻的关系：关断能量（左边）与过电压（右边）

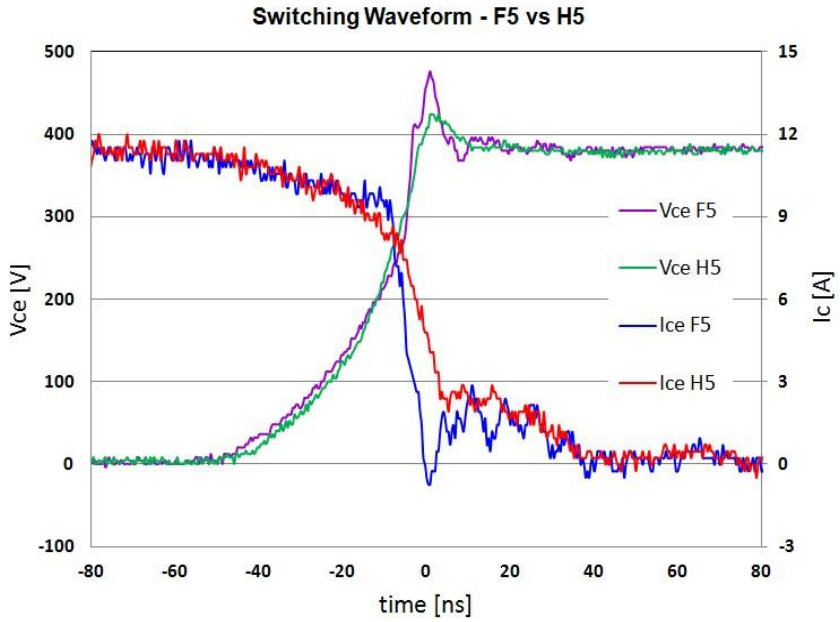

图 4 H5 系列与 F5 系列的典型关断波形

图 5 所示为 F5 系列与 H5 系列产品的导通损耗(Eon)与导通电阻（Rg on）的关系，从图中可以看出 TRENCHSTOP™ 5 与超级结 MOSFET 在同等的额定功率具有很相似的特性，和以前各代 IGBT 比较，损耗明显降低。因此可以得出结论，F5 与 H5 系列产品的开通特性可以通过导通电阻（$R_{g\,on}$）将其控制在一个宽的范围内。

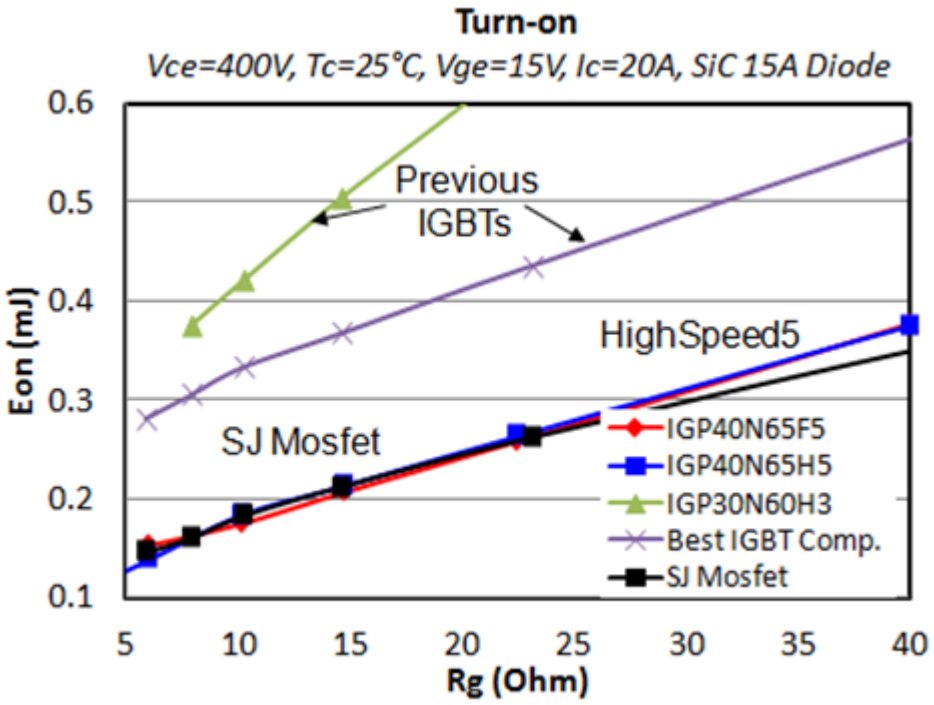

图 5 R_{gon} 对导通损耗的影响

图 3、4 与 5 得到如下结论：

a. 根据设计者的需要，这两个系列的 IGBT 为设计者提供了或者如 H5 一样易于处理的 IGBT，从而容易使用，或者如 F5 的高速开关 IGBT，不过应用时需要注意减小换流回路杂散电感，但是有更高的效率。
b. 有可能控制关断时的过电压和关断损耗。
c. 有可能控制开通特性，以及开通损耗与超级结 MOSFET 差不多。
d. 可以实现开关损耗和过电压的最尽可能折中设计。为限制关断时的过电压，F5 系列要求采用比 H5 系列更大的栅极驱动电压。
e. F5 系列由于有更高的电流变化率 di/dt 而使得效率更高，在使用时要求换流回路杂散电感要小以及联合使用碳化硅二极管。
f. 与 F5 系列相比，由于 H5 系列关断过程特性比较软，因此 H5 可以使用低至 5Ohm 的栅极驱动电阻。

3 工业应用时的性能测量-太阳能逆变器的逆变环节

3.1 损耗计算

在工业应用的样例测试时，采用与 H5 系列同等规格的 HS3 产品进行对比测试分析。
对于较大负载电流与较高开关速度应用场合，先用 H5 系列产品测试以便 是首先被采用的方案，因 H5 是推荐用来检验 TRENCHSTOP™ 5 技术的有效性。在此测试基础上，F5 可以通过优化 PCB 层、驱动设计、以及系统开关频率来获得额外的效率提升。

通过应用调查，仅在即插即用的场合的研究，表明了只有 F5 能提高系统效率。
在研究太阳能光伏逆变器的实际应用之前，我们首先来看下与英飞凌 HS3 系列产品比较， H5 如何降低功率损耗的。基于一个：占空比为 0.5 的 20A 矩形波，结温为 100℃，每种 IGBT 的总体功率损耗与开关频率的关系曲线如图 6 所示：

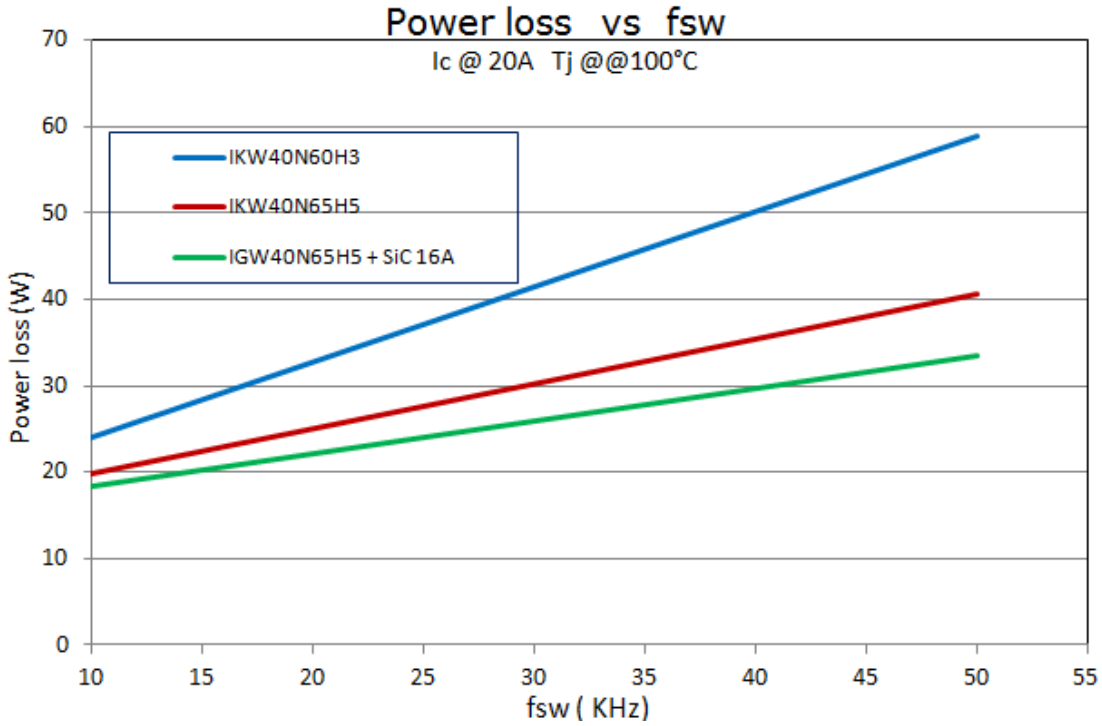

图 6 功率损耗与开关频率的关系

20KHz 是现代太阳能光伏逆变器最常用的开关频率，在这个频率时，每个 IGBT 的总损耗从使用 HS3 系列的 32.8W 下降到使用 H5 系列时的 25.04W。

从测试数据我们可以看到，采用新一代 H5 系列产品（驱动电路或者电路板没有改变）时的损耗降低了约 24%。此外，如果用 IGW40N65H5 外加英飞凌第二代 SiC 碳化硅二极管代替集成了快速二极管作为续流二极管的 IKW40N65H5，损耗将进一步减小 11%。当考虑开关频率对损耗影响时，测试结果表明在频率为 33KHz 时 H5 系列的开关损耗与 HS3 系列的相当。当 H5 系列与 SiC 碳化硅二极管联合使用时，开关频率可拓宽到 46KHz。开关频率提高让设计者有机会通过减小无源器件体积来减小系统的成本和体积。

选择器件是保证设计满足热设计要求的关键。设计最大允许的损耗和结温是根据散热条件、对流情况以及功率器件和磁件的布置确定的。因此，电气设计工程师最主要的任务之一是保证所有功率器件的结温能满足 Tjmax 的降额使用，如 80%。这就确定了每个器件允许的最大损耗。以下举一个实际的例子来说明 H5 系列产品的性能，假设设计的最大结温为 100℃。额定电流 40A 的器件在上述相同的负载条件下（负载电流幅值为 20A 的方波，占空比为 0.5），TO-247 封装时的最大

允许损耗是 40W。在 40W 时，对于 100℃的最大设计结温，HS3 系列最大允许工作频率大约为 28KHz。但是对于 H5 系列，在相同结温下，开关频率可以达到 50KHz，频率差不多提高了 50%。

在保持热性能不变情况下，能提高开关频率有利于降低成本和提高可靠性。提高开关频率能使用更小、更轻的磁性元件，以及减少甚至不用电解电容。尽管提高开关频率会使设计变复杂，但是在如无源器件占主要材料成本的太阳能逆变器与 UPS 中，提高开关频率带来的好处也是明显的。下面一个例子是在 Fraunhofer Institue ISE 研究所测试的 HERIC 电路拓扑。在保证全负载范围效率相同情况下，相比于 TRENCHSTOP™ 其它系列相应的产品，H5 系列允许开关频率宽达三倍，从 16KHz 到 48KHz。也就是说，如果采用 16KHz 开关频率，整个系统的效率将提高。最有效地发挥新型 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 技术的优势是一个很明显需要采用的设计策略。

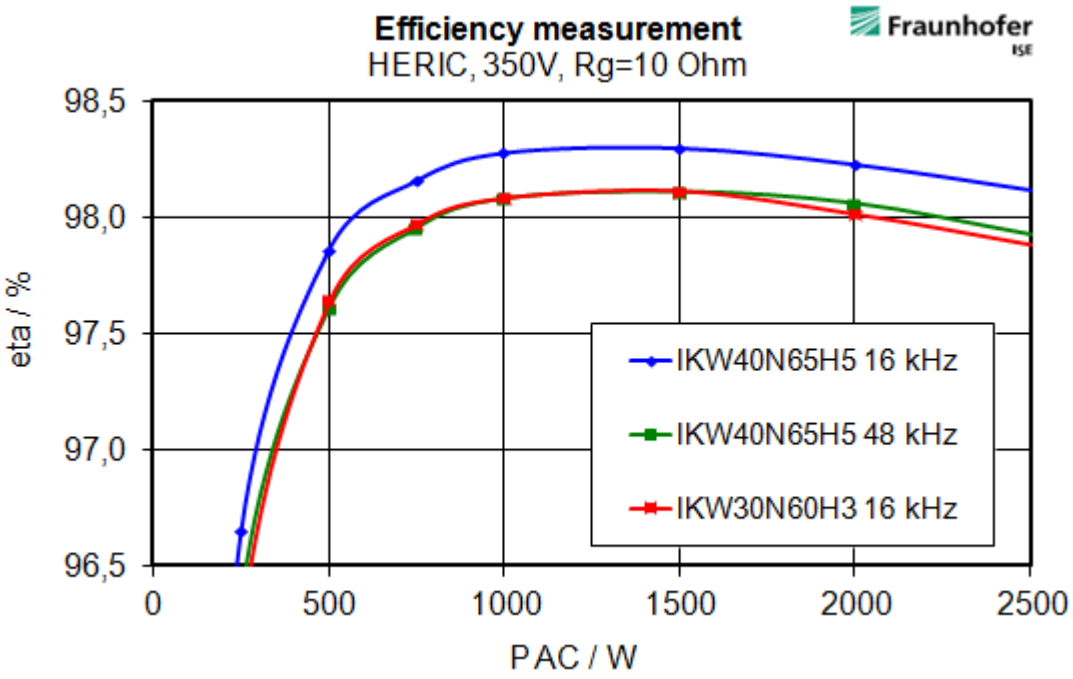

图 7 不同开关频率时的效率

图 7 所示为 HS3 与 H5 系列 IGBT 的效率。当使用碳化硅二极管作为续流二极管或者 F5 系列 IGBT 时，效率可以进一步提高。

对于有能力处理采用新系列 IGBT 带来复杂问题的设计工程师和公司，他们就能给终端客户推出与别人不同的设备系统，从而增加市场份额。

3.2 双极性 H 桥测试平台

测试平台为英飞凌开发的室内用 3KW 逆变器，逆变器的电路拓扑采用如图 8 所示的双极性 H 桥。对采用 H5 系列 IGBT 和联合使用不同二极管（例如碳 SiC 与 Si）的 HS3 系列 IGBT 做了直接比较。测量时开关频率是 20KHz，该频率为现在太阳能光伏逆变器典型的开关频率。通过测量，记录下了效率曲线与温度曲线如图 9 和 10 所示。

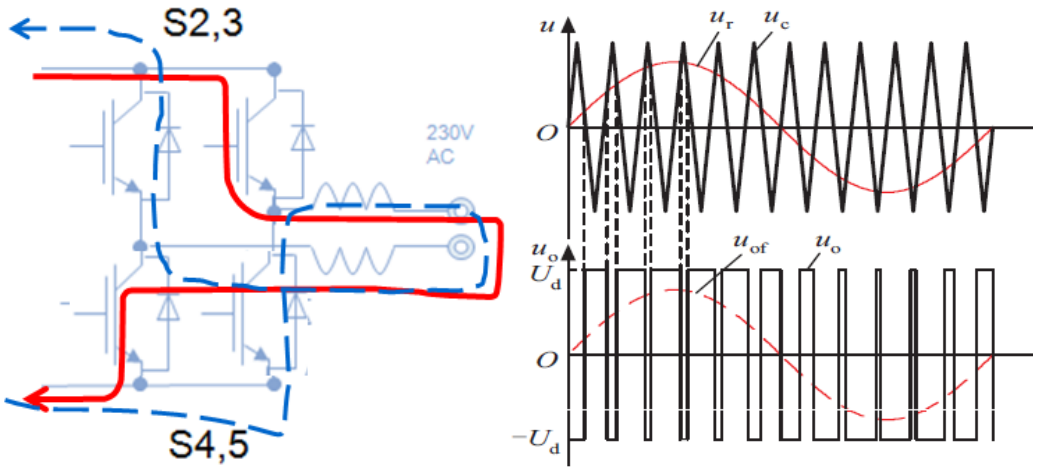

图 8　H 桥拓扑结构和双极性调制方法

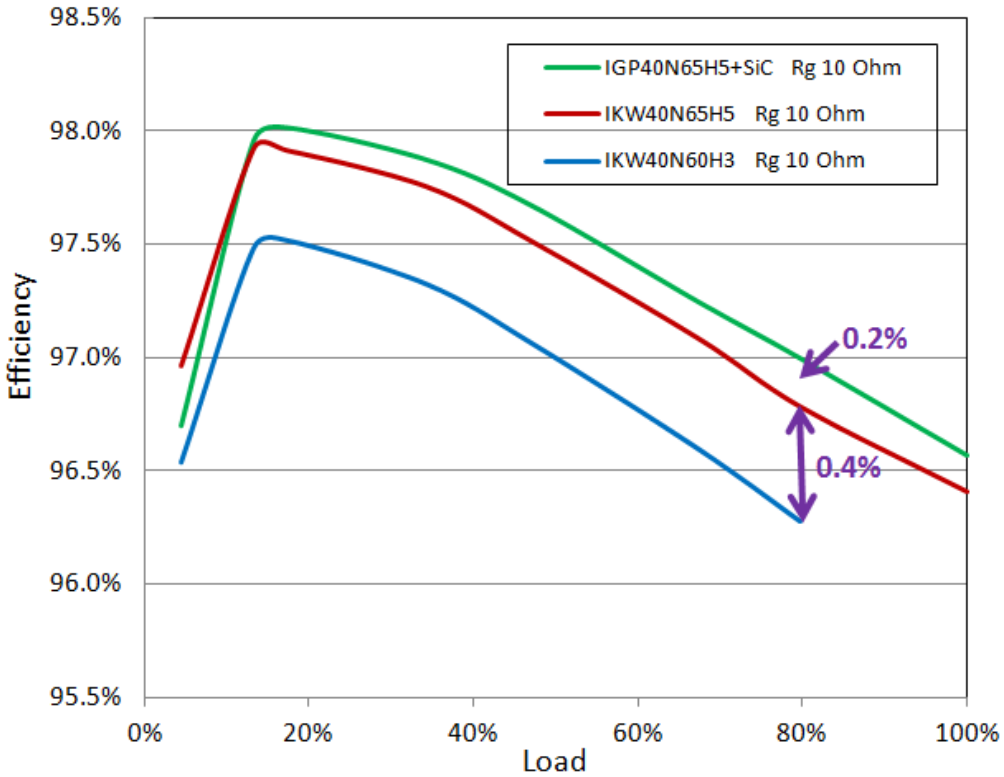

图 9 效率与负载的关系曲线

测试板当采用双管封装的 H5 系列 IGBT 作为开关器件时，它的效率从轻载时的 97%开始，在大约 15%满载时达到峰值效率 97.97%。由于设计的输出滤波器没有完全优化，测试板的效率在大于 600W 时开始下降，在满载 3KW 时达到 96.4%。与相同规格的 HS3 系列 IGBT 的效率特性相比，采用简单的即插即用方法时，效率在整个负载范围内提高了约 0.4%。

还做了其它测试。在这些测试中，使用 SiC 碳化硅二极管代替快速的反并联续流二极管，测试结果如图 9 绿色曲线所示。图中可以看出，效率进一步提高了 0.2%，这使得峰值效率超过 98%。这是在 H 桥中采用 IGBT 时，系统效率第一次达到 98%。

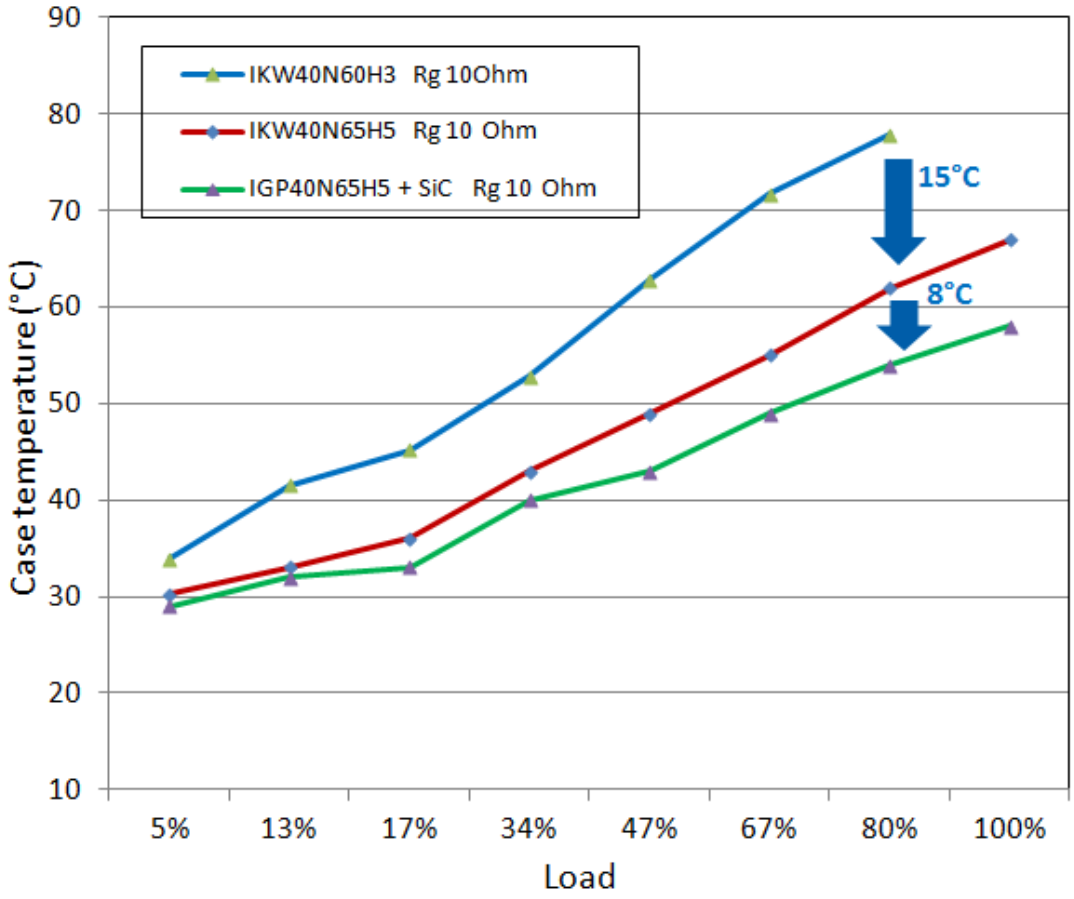

图 10　器件外壳温度随负载变化关系曲线

图 10 同时给出了器件外壳温度随负载变化关系曲线。图 10 证明了 TRENCHSTOP™5 技术与 HS3 系列相比优势明显。在重载条件下，模块封装的表面温度降低了 15℃，此时效率是提高了 0.4%。此外，当使用 SiC 二极管作为续流管时，温度又降低了 8℃。

因此，上面测试清楚表明：H5 系列 IGBT 比 HS3 系列有更好的热性能和更高的效率。这些性能提高的主要原因是因为载流子优化使得 IGBT 开关速度更快。

图 11 所示为 HS3 与 H5 系列的开关波形特性图。波形图给出了关断过程中的过电压和关断电流速度。请注意 X 轴的刻度，这对于高速 IGBT 是很重要的，在英飞凌高速 IGBT 里不再有传统 IGBT 的拖尾电流。

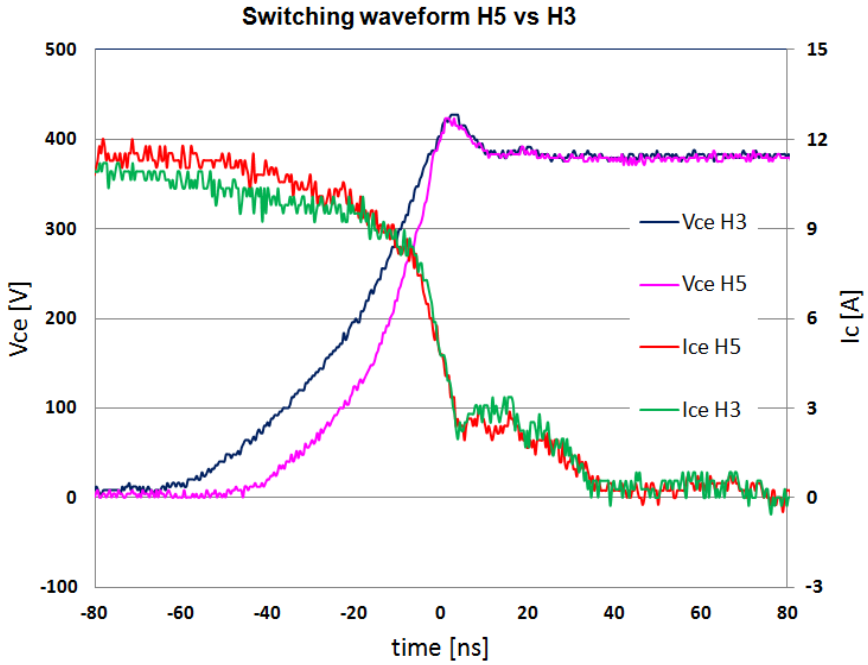

图 11　H5 与 H3 系列的开关波形

从图 11 波形可以看到，H5 系列 IGBT 的电流变化率与 HS3 系列的一样。H5 系列与 HS3 系列相比效率更高，是因为 H5 系列的 IGBT 集电极与发射极之间的电压建立速度更快，从而使得关断损耗 Eoff 大大减小。.

此外，如图 12 所示的 H5 系列的过电压在整个负载范围内与 HS3 系列的相似。这可以说明 H5 系列 IGBT 有良好的 EMI 特性和易于控制的最大电压尖峰。

H5 系列比 HS3 系列耐压值提高了 50V，这对于设计工程师是个很好的好处。

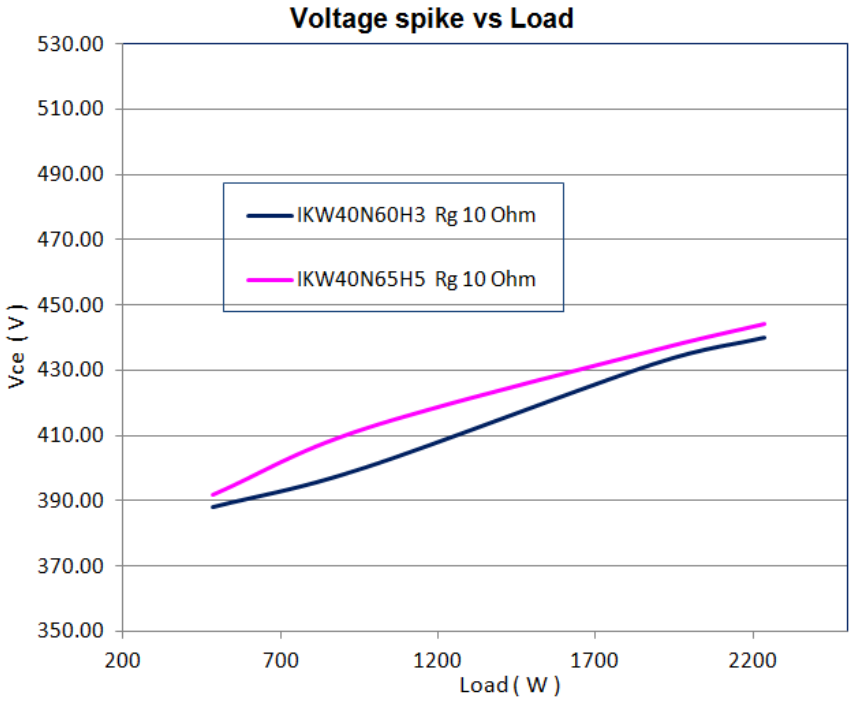

图 12　H5 与 H3 系列的电压尖峰

4 总结

通过应用测试表明了 TRENCHSTOP™5 在快速开关 IGBT 市场上树立了一个新的标杆。由于综合采用了最优化载流子和英飞凌先进的薄晶片技术，可看到在硬开关的 H 桥测试平台上，IGBT 的开通和关断损耗都大大减小，此外再由于饱和导通电压 Vcesat 低，这使得整机系统效率高于 98%。。

此外，过电压尖峰金和 EMI 特性有良好可控性，新系列的 IGBT 这些特性与著名的 HS3 系列差不多。

采用快速二极管作为续流二极管的 H5 系列为高性能工业应用如太阳能光伏逆变器、UPS 与焊接提供了一个易于使用的解决方案。

综合采用 H5 系列与碳化硅二极管可进一步提高效率，在介绍使用 F5 系列时将介绍如何进一步优化使用。

TRENCHSTOP™5 为设计者提供了有诸多优越性能的 IGBT。这有待于设计工程师去充分挖掘利用。

5 参考文献

[1] “Trenchstop™5: A new application specific IGBT series”; Thomas Kimmer, Erich Griebl, PCIM Europe 2012, Nuremberg, Germany

[2] “High Speed IGBT with MOSFET-like switching behavior”; Davide Chiola, Holger Hüsken, Thomas Kimmer, PCIM China 2010

[3] “The Field Stop IGBT (FS IGBT) - A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential”; T Laska, M. Münzer, F. Pfirsch, C. Schaeffer, T. Schmidt; ISPSD 2000, May 22-25, Toulouse, France