第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块

7th-Generation “X Series” RC-IGBT Module for Industrial Applications

山野 彰生 YAMANO, Akio　　高桥 美咲 TAKAHASHI, Misaki　　市川 裕章 ICHIKAWA, Hiroaki

近年来，IGBT 模块面临着小型化、低损耗化、高可靠性化的强烈需求。为响应这一需求，富士电机运用将 IGBT 和回流二极管 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT），开发出了产业用 RC-IGBT 模块。同时，通过运用和优化第 7 代“X 系列”的技术，大幅降低了损耗和热阻，提升了可靠性。这些技术革新，扩大了额定电流，实现了高功率密度化和小型化，这是旧型 IGBT 和 FWD 的组合难以实现的。

In recent years, IGBT modules have been increasingly required to be smaller in size while exhibiting lower loss and higher reliability. To meet the requirements, Fuji Electric has developed an industrial-use reverse conducting IGBT (RC-IGBT) module by using an RC-IGBT that integrates an IGBT and a free wheeling diode (FWD) on a single chip. Furthermore, the module greatly reduces loss and thermal resistance and enhances reliability through optimization based on our 7th-generation “X Series” technology. These technology innovations have achieved enhancements such as expansion of rated current, increased power density and miniaturization, all of which were impossible through the combination of conventional IGBT and FWD.

1 引言

近年来，为防止全球气候变暖，打造安全、安心、可持续的社会，能够高效利用能源、为节能做贡献的电力电子技术备受期待。其中，作为产业、民生、汽车、可再生能源等多个领域中使用的电力转换装置的关键元件，功率半导体的需求日益增加。

富士电机自 1988 年实现功率半导体 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块的产品化以来，通过了多项技术革新，推进了 IGBT 模块的小型化、低损耗化和高可靠性化，为电力转换装置的小型化、低成本化和高性能化做出了贡献。但是，如果想要 IGBT 模块进一步小型化，功率密度就会增加，这会引发 IGBT 和回流二极管 FWD（Free Wheeling Diode）运行温度上升，并导致可靠性降低，造成危险。为此，为保持高可靠性，同时实现 IGBT 模块的小型化，芯片和封装的技术革新是不可欠缺。

富士电机进行芯片和封装的技术革新，实现了第 7 代“X 系列”IGBT 模块的产品化[1],[2]。并开发了将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT），从而开发出了搭载第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块[3],[4]。通过运用第 7 代 X 系列的芯片技术，优化芯片结构，在保持产生的损耗与 X 系列 IGBT 和 X 系列 FWD 组合使用时相同的情况下，减少了芯片数量和总芯片面积。并且，通过组合第 7 代 X 系列的封装技术和 RC-IGBT，还降低了热阻，提升了可靠性。这些技术革新，实现了 IGBT 模块进一步的高功率密度化和小型化，这是旧型 IGBT 和 FWD 的组合难以实现的。

2 特点

2.1 “X 系列”产业用 RC-IGBT 的特点

旧型 IGBT 通过对栅极外加电压，使得仅集电极到发射极的方向有电流通过。变频器作为电力转换装置而被广泛使用，其负载元件电感器由于自诱导作用，在妨碍电流变化的方向产生感应电动势。因此，要想在断开 IGBT 时，同一方向仍有电流通过，必须以反并联的方式连接 FWD 和 IGBT，使电流反向流动。对此，“X 系列”产业用 RC-IGBT（X 系列 RC-IGBT）通过使用 RC-IGBT，以一个元件实现了上述要求（**图 1**）。

图 2 中展示了 X 系列 RC-IGBT 的截面图。X 系列 RC-IGBT 是运用了第 7 代 X 系列 IGBT 的芯片技术，表面采用沟槽栅结构，背面采用电场终止（FS）层结构的 IGBT。X 系列 RC-IGBT 和 X 系列 IGBT 一样，通过在第 6 代“V 系列”IGBT 的基础上进一步微细化，并优化表面结构，大幅削减了影响到导通损耗的集电极 – 发射极间饱和电压 $V_{CE(sat)}$。并且，通过运用最先进的薄晶圆加工技术，改善了饱和电压

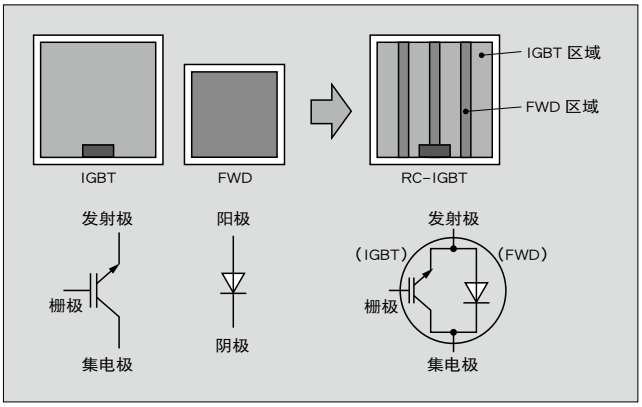


图 1 “X 系列”RC-IGBT 的简图和等效电路

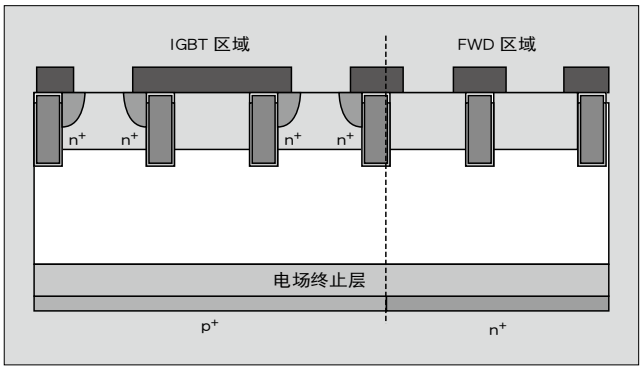


图 2 “X 系列”RC-IGBT 的截面图

和关断时的开关损耗的均衡关系。X 系列 RC-IGBT 内置于 FWD 区域内，因此，在集电极侧具有 pn 接合。因此，追加了背面图样形成和杂质层形成工序，在同一芯片的背面形成了 IGBT 集电极侧的 p 型层和 FWD 阴极侧的 n 型层。还通过优化寿命控制，改善了均衡特性。

2.2 电气特性

图 3 中展示了 1200 V X 系列 RC-IGBT 的输出特性。X 系列 RC-IGBT 能用一块芯片向正向（IGBT）和反向（FWD）的两方向输出电流。通过运用第 7 代 X 系列的芯片技术，实现了比 V 系列 IGBT 更低的饱和电压。另外，RC-IGBT 通过向 FWD 区域的阴极层注入电子，使得 IGBT 集电极层的电动注入受到抑制，很难发生电导率调制。因此，有报告称在低饱和电压区域中会发生骤回现象[5],[6]。针对这一问题，X 系列 RC-IGBT 通过对芯片的各结构进行优化，消除了骤回现象。

X 系列 RC-IGBT 的关断波形如**图 4** 所示，开通波形如**图 5** 所示，反向恢复波形如**图 6** 所示。从**图 4** 可以看出，X 系列 RC-IGBT 的浪涌电压，与 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合、X 系列 IGBT 和 X 系列 FWD 的组合是相同的。并且，尾电流小于 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合，关断损耗 E_{off} 降低 23%，观测不到异常波形。X 系列 RC-IGBT 为改善特性，相比 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合，采用了更薄的晶圆。因为使用薄晶圆，关断时的振动和耐压的降低令人担忧，但 X 系列 RC-IGBT 通过优化晶圆

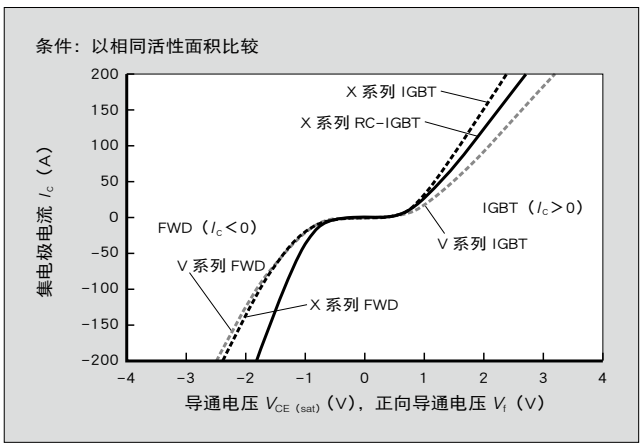


图 3 “X 系列”RC-IGBT 的输出特性

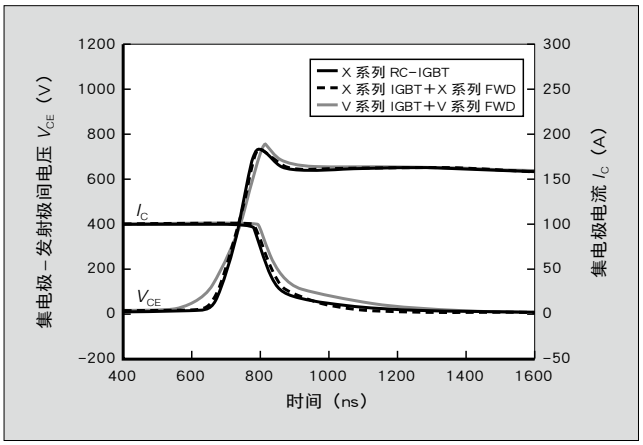


图 4 “X 系列”RC-IGBT 的关断波形

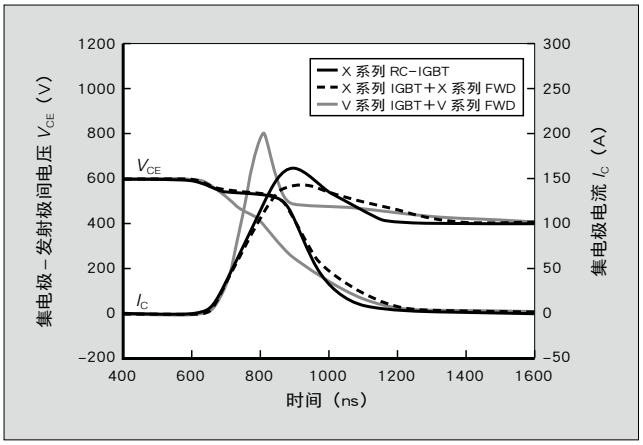


图 5 “X 系列”RC-IGBT 的开通波形

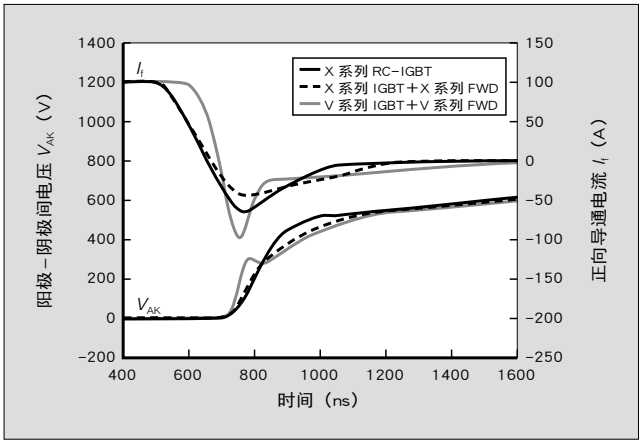


图 6 “X 系列”RC-IGBT 的反向恢复波形

的电阻率和各结构，抑制了振动和耐压的降低。如**图 5** 和**图 6** 所示，V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合会产生剧烈的波形，而 X 系列 RC-IGBT 通过优化寿命控制，实现了更加柔和的电流波形。由于反向恢复电流的峰值 I_{rrm} 和尾电流的降低，反向恢复损耗 E_{rr} 减少了 20%。另外，开通波形和反向恢复波形都观测不到异常波形。

图 7 中展示了以相同活性面积比较的 IGBT 的均衡特性。图中 X 系列 RC-IGBT 的各点代表了凭借寿命控制的变更，而对均衡特性进行调整后的结果。X 系列 RC-IGBT 在相

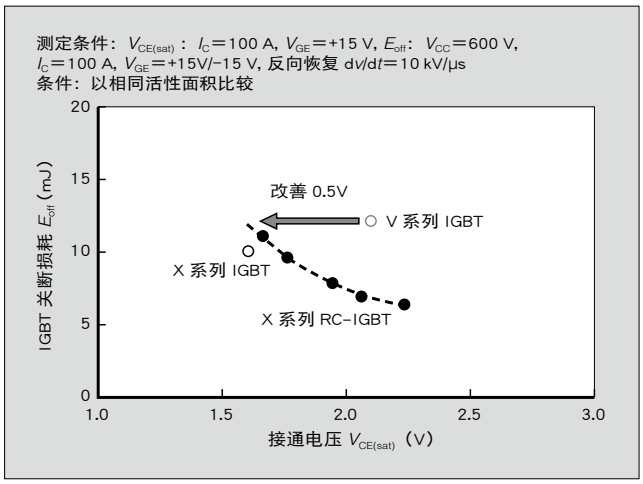


图 7 “X 系列”RC-IGBT（IGBT）的均衡特性

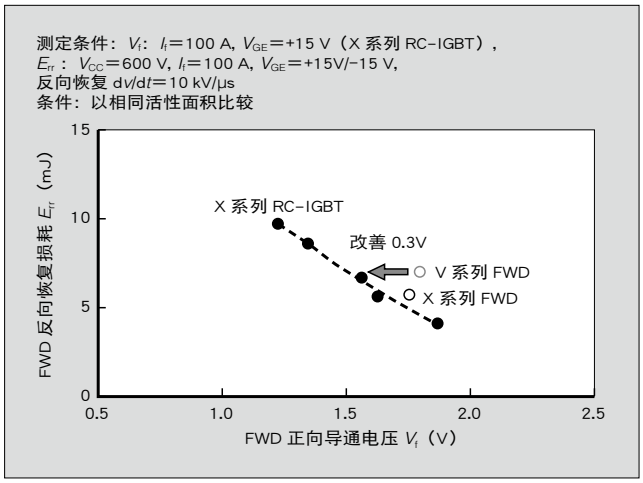


图 8 “X 系列”RC-IGBT（FWD）的均衡特性

同开关损耗下，相比 V 系列 IGBT，饱和电压改善了 0.5 V。同时，还有望实现与 X 系列 IGBT 相同的 IGBT 特性。

图 8 中展示了以相同活性面积比较的 FWD 的均衡特性。图中 X 系列 RC-IGBT 的各点与**图 7** 一样，为对均衡特性进行调整后的结果。X 系列 RC-IGBT 在相同开关损耗下，相比 V 系列 FWD，正向导通电压改善了 0.3 V。同时，还有望实现与 X 系列 FWD 相同的 FWD 特性。

2.3 热特性

X 系列 RC-IGBT 通过对 IGBT 和 FWD 单芯片化，以整个芯片对 IGBT 区域或 FWD 区域中产生的损耗导致的发热进行散热。因此，有望降低热阻。并且，为进一步降低热阻，作为第 7 代 X 系列的封装技术，采用了全新的 AIN（氮化铝）绝缘基板。

AIN 绝缘基板热导率高，因此热阻低，但抗弯强度低，因此通过采用比作为绝缘基板而广泛使用的 Al_2O_3（氧化铝）绝缘基板更厚的陶瓷，实现了实用化。但这其中也存在一项课题，即若增加基板厚度，会导致热阻和可靠性受损。因此为改善这些问题，必须实现 AIN 绝缘基板的薄型化。过去，若对 AIN 绝缘基板进行薄型化，安装工序中可能会出现基板断裂、绝缘耐量降低的情况，无法实用化。针对这一问题，

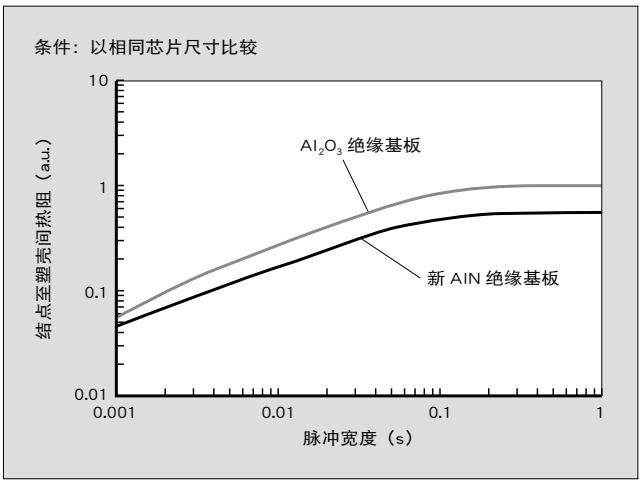


图 9 结点至塑壳间热阻

富士电机通过调整 AIN 烧结条件，实现高强度化，并通过调整沿面距离，优化绝缘设计，制造出了成功薄型化的新 AIN 绝缘基板。

图 9 中展示了结点 – 塑壳间热阻。新 AIN 绝缘基板相比 Al_2O_3 绝缘基板，相同芯片尺寸下，实现了热阻降低约 45% 的大幅改善。由此解决了 IGBT 模块小型化导致的温度上升课题。并且，采用优化引线接合和使用高强度焊锡和高耐热硅胶，确保高可靠性的同时，也实现了 175 ℃下的连续运行。

3 高功率密度化和小型化

表 1 中展示了 X 系列 RC-IGBT 的 1200 V/100 A IGBT 模块的比较，**图 10** 中展示了各模块的耗电量、接合

表 1 1200 V/100 A IGBT 模块的比较

项目	X 系列 RC-IGBT 模块	V 系列 IGBT 模块
芯片	X 系列 RC-IGBT	V 系列 IGBT＋ V 系列 FWD
绝缘基板	新 AIN 绝缘基板	Al_2O_3 绝缘基板
连续运行温度 T_j（℃）	175	150

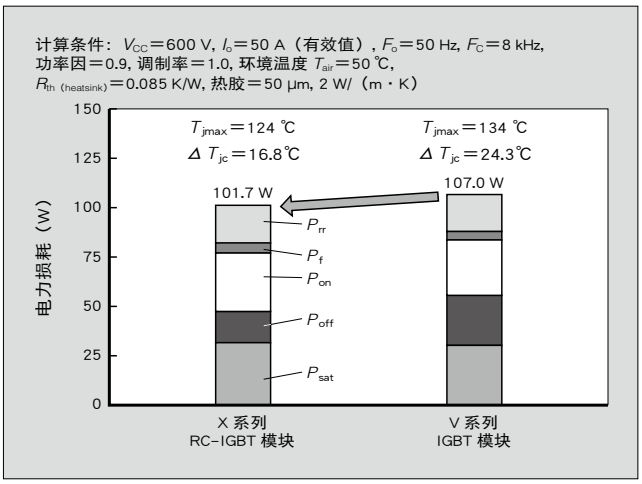


图 10 1200 V/100 A IGBT 模块下的电力损耗和接合温度

表 2　额定电压 1200 V 的“Dual XT”和 PrimePACK2 的产品阵容

产品名	额定电流 （A）						
	225	300	450	600	800	900	1000
Dual XT	V 系列 IGBT＋V 系列 FWD						
	X 系列 IGBT＋X 系列 FWD						X 系列 RC-IGBT
PrimePACK*2				V 系列 IGBT＋V 系列 FWD			

* PrimePACK： Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

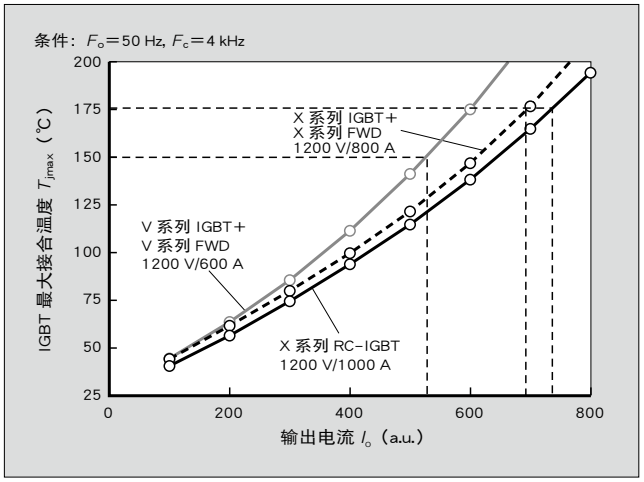
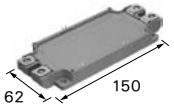
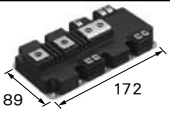


图 11　“Dual XT”的 IGBT 最大接合温度

表 3　额定电压 1200 V 的“Dual XT”和 PrimePACK2 的特点

项目	Dual XT			PrimePACK*2
外观	 62 150			 89 172
模块设置面积（cm^2）	93	93	93	153
芯片	V 系列 IGBT＋V 系列 FWD	X 系列 IGBT＋X 系列 FWD	X 系列 RC-IGBT	V 系列 IGBT＋V 系列 FWD
模块额定电流（A）	600	800	1000	900
绝缘基板	SiN 绝缘基板	新 AlN 绝缘基板	新 AlN 绝缘基板	Al_2O_3 绝缘基板
热阻 $R_{th(jc)}$（K/W）	IGBT： 0.04 FWD： 0.06	IGBT： 0.037 FWD： 0.044	IGBT： 0.022 FWD： 0.022	IGBT： 0.03 FWD： 0.054

* PrimePACK： Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

温度 T_j 和接合温度的变动 ΔT_{jc} 的计算结果。通过运用第 7 代 X 系列的芯片技术和封装技术，相比过去的 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合，电力损耗和热阻大幅降低，确保了高可靠性，同时保证了 175 ℃下的连续运行。另外，通过使用 X 系列 RC-IGBT，可减少芯片数量和总芯片面积，有望实现 IGBT 模块的小型化。

因此，凭借运用 RC-IGBT 的芯片技术和第 7 代 X 系列的芯片技术、封装技术，在相同封装中，可实现比旧型 IGBT 和 FWD 的组合更大的额定电流。

表 2 中额定电压 1200 V 产品阵容中的 Dual XT 和 PrimePACK2〈注〉，**表 3** 中展示了其特点。额定电压 1200 V 的 Dual XT 中，V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合的额定电流上限为 600 A。而凭借第 7 代 X 系列的芯片技术和封装技术，组合 X 系列 IGBT 和 X 系列 FWD 后，将额定电流扩大至了 800 A。并且，通过使用 X 系列 RC-IGBT，以相同封装，可提供额定电流 1000 A 的模块。相比使用 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的 PrimePACK2，Dual XT 的模块设置面积减小 40%，且通过使用 X 系列 RC-IGBT，热阻 $R_{th(jc)}$ 减小 27%。由此，可覆盖过去的 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的 PrimePACK2 的领域。

〈注〉PrimePACK：Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

图 11 中展示了使用 V 系列 IGBT 和 V 系列 FWD 的组合、X 系列 IGBT 和 X 系列 FWD 的组合以及 X 系列 RC-IGBT 的各 Dual XT，其变频器运行时的输出电流 I_o 和 IGBT 最大接合温度 T_{jmax} 的计算结果。另外，通过使用 X 系列 RC-IGBT，降低了电力损耗和结点 – 塑壳间热阻。并且，通过运用第 7 代 X 系列的封装技术，连续运行保证温度从过去的 150 ℃扩大到了 175 ℃。最终，实现了相同封装下，比过去更高的电流密度，从而实现了 IGBT 模块进一步的高功率密度化和小型化。因此，可响应小型化、低损耗化、高可靠性化等 IGBT 模块所面临的要求。

4　后记

本稿对通过搭载 IGBT 和 FWD 单芯片化后的 RC-IGBT，实现了进一步高功率密度化和小型化的第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块进行了介绍。凭借这一模块，可实现电力转换装置进一步的小型化和成本削减，从而广泛贡献于社会。本公司今后还会继续推动 IGBT 模块的技术革新，为实现安全、安心、可持续发展的社会作贡献。

参考文献

(1)　Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th

Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”, Proceeding of PCIM Europe 2015.
⑵ 川畑润也等. 第 7 代“X 系列”IGBT 模块. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.15-19.
⑶ Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”, Proceeding of PCIM Europe 2016.
⑷ Takahashi, K. et al. “1200V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”, Proceeding of PCIM Europe 2014.
⑸ Takahashi, H. et al. “1200V Reverse Conducting IGBT”, Proceeding of ISPSD 2004. p.133-136.
⑹ M, Rahimo. et al. “The Bi-mode Insulated Gate Transistor (BIGT) A Potential Technology for Higher power Applications”, Proceedings of ISPSD 2009. p.283-286.

山野　彰生
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部模块技术部。

高桥　美咲
从事功率半导体芯片的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部元件开发部。

市川　裕章
从事 IGBT 模块的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部模块技术部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。