# 第 7 代“X 系列”产业用 1200V/2400A RC-IGBT 模块

7th-Generation “X Series” 1,200-V / 2,400-A RC-IGBT Modules for Industrial Applications

挂布　光泰 KAKEFU, Mitsuhiro　　山野　彰生 YAMANO, Akio　　平田　朋也 HIRATA, Tomoya

为了满足 IGBT 模块小型化和高可靠性化的市场要求，富士电机开发了将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）。将第 7 代“X 系列”芯片技术及封装技术与 RC-IGBT 技术相结合，将第 7 代“X 系列”产业用 1200 V RC-IGBT 模块系列化，加入 2400 A，扩大了额定电流。由此，与传统产品相比，大幅改善了实际工作时的芯片接合温度和接合温度温升，有助于电力转换装置输出的进一步提高、小型化和高可靠性化。

In order to meet the market demand for smaller and more reliable IGBT modules, Fuji Electric has developed reverse-conducting IGBTs (RC-IGBTs), which integrate IGBTs and FWDs on a single chip. Specifically, we created a line-up of 7th-generation “X Series” 1,200-V RC-IGBT modules for industrial applications that combine 7th-generation “X Series” chip and packaging technologies with RC-IGBT technology. More recently, we have enhanced the line-up by adding 2,400-A products to increase the current rating. This enhancement substantially improves chip junction temperature and junction temperature rise during operation compared with conventional products. This contributes to further output improvement, miniaturization, and higher reliability for power conversion systems.



## 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器件元件，功率半导体的需求日益增加。

1988 年，富士电机实现了功率半导体的 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块的产品化。自此，通过 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。为了进一步做出贡献，就需要使 IGBT 模块的尺寸比以往更小，但这样会因功率密度的增大而导致 IGBT 器件和续流二极管 FWD（Free Wheeling Diode）元件的运行温度上升和可靠性下降。为此，为保持高可靠性，同时实现 IGBT 模块的高功率密度化，芯片和封装的技术革新不可欠缺。

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，并凭借 IGBT 模块的低损耗化和高可靠性化，实现了高功率密度化[1),2)]。而且，还进一步开发了将 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导通 IGBT[3),4)]），降低了产生的损耗，同时减少了芯片数量和总芯片面积。

X 系列 RC-IGBT 模块通过在 X 系列 IGBT 模块的芯片技术和封装技术的基础上加入 RC-IGBT 技术，实现了基于更高功率密度的小型化。此次，开发了搭载 RC-IGBT 的 1200 V/2400 A 额定 PrimePACK™〈注〉3+，并将其加入到产品系列之中。

## 2　第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 模块的特点

**图 1** 所示，为 X 系列 RC-IGBT 简图和等效电路。在广泛用作电力转换装置的电压型变频器中，需要将 IGBT 和 FWD 反向并联连接。以前，需要 IGBT 和 FWD 两个芯片，但是 RC-IGBT 则在一个芯片中包含了 IGBT 的工作区域和 FWD 的工作区域。

X 系列 RC-IGBT 凭借 X 系列的芯片技术，在第 6 代“V 系列”IGBT 的基础上进一步微细化，大幅降低了集电极和发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$。另外，通过应用最先进的薄晶圆加工技术，改善了 $V_{CE(sat)}$ 与开关损耗的权衡关系。一般情形下，因为使用薄晶圆，关断时的电压振动和耐压的降低令人担忧，但 X 系列 RC-IGBT 通过优化芯片结构，抑制了电压振动和耐压的降低。

此外，由于采用了 X 系列 IGBT 封装技术之一的高散

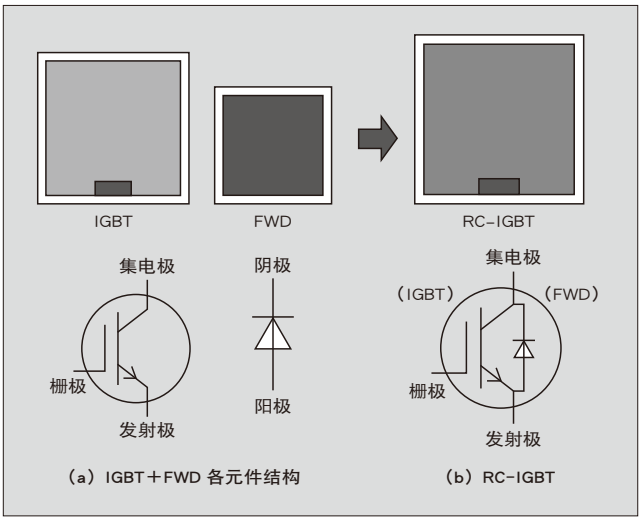



图 1　第 7 代“X 系列”产业用 RC-IGBT 简图与等效电路

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

热绝缘基板，大幅降低了热阻。同时，凭借优化引线焊接和使用高强度焊锡，高耐热硅胶，在保证接合温度 175 ℃下连续运行的同时，也确保了高可靠性。

通过采用这些技术，RC-IGBT 模块实现了在相同封装尺寸下比组合 IGBT 与 FWD 两个芯片的传统 IGBT 模块更高的额定电流。[5]–[8]

## 3 产品阵容

**表 1** 所示为 X 系列 RC-IGBT 模块的产品阵容。

**表 2** 所示为此次新系列化的 X 系列 RC-IGBT 模块 PrimePACK ™ 3+ 的外观照片。RC-IGBT 模块封装尺寸与传统额定电流为 1800 A 的 X 系列 IGBT 模块相同，实现了 2400 A 的额定电流。

## 4 第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT 模块 PrimePACK ™ 3+ 的特性

(1) 关断损耗

**图 2** 所示为 X 系列 RC-IGBT 模块的 $V_{CE(sat)}$ 与关断损耗的均衡特性。X 系列 RC-IGBT 模块与 V 系列 IGBT 模块相比，饱和电压降低 0.65 V，关断损耗降低 42%，大幅改善了均衡特性。由此，实现了高效化和高电流密度化。

另一方面，在大电流通过的情况下，传统的 V 系列 IGBT 模块的输出端子可能会因其配线电阻而发热，温度上升过高，因此输出电流的扩大受到限制。因此，为了降低配线电阻，在与传统的 V 系列 IGBT 模块相比不改变外形尺寸的情况下，X 系列 RC-IGBT 模块将输出端子的数量从 1 个端子增加至 2 个端子。

(2) 输出端子温度

**图 3** 所示为传统 V 系列 IGBT 模块与 X 系列 RC-IGBT 模块通电试验时输出端子温度的测量结果。X 系列 RC-IGBT 模块可在通电时降低每个端子的电流。因此，与传统

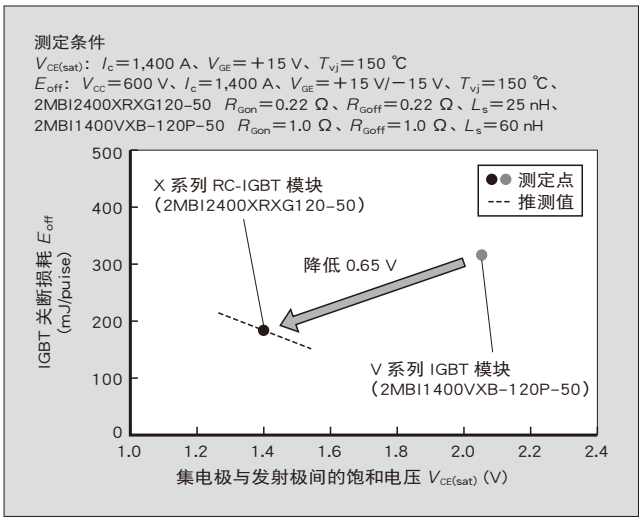


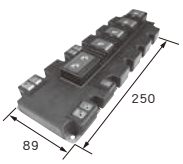
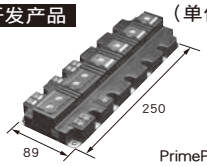

图 2 IGBT 的均衡特性

表 1 X 系列 RC-IGBT 模块的产品阵容

| 产品名 | 产品型号 | 额定电压 | 额定电流 | 备注 |
|---|---|---|---|---|
| Small-PIM2 | 7MBR50XRKD120-50 | 1200 V | 50 A | 焊针 |
| | 7MBR50XRKB120-50 | | | 压接针 |
| PC3 | 6MBI250XRBE120-50 | | 250 A | 焊针 |
| | 6MBI250XRXE120-50 | | | 压接针 |
| DualXT | 2MBI1000XRNE120-50 | | 1000 A | 焊针 |
| | 2MBI1000XRNF120-50 | | | 压接针 |
| PrimePACK ™ 3+ | 2MBI2400XRXG120-50 | | 2400 A | — |
| DualXT | 2MBI800XRNE170-50 | 1700 V | 800 A | 焊针 |
| | 2MBI800XRNF170-50 | | | 压接针 |
| PrimePACK ™* 3+ | 2MBI2200XRXG170-50 | | 2200 A | — |

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

表 2 产品的外观

| | | 额定电流 （A） | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1400 | 1800 | 2400 |
| 1200 V | X 系列 | X-IGBT + X-FWD | | X-RC-IGBT |
| | V 系列 | V-IGBT + V-FWD | | |
| 产品外观 | | 传统产品 （单位： mm）   PrimePACK ™* 3 | | 新开发产品 （单位： mm）   PrimePACK ™* 3+ |

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

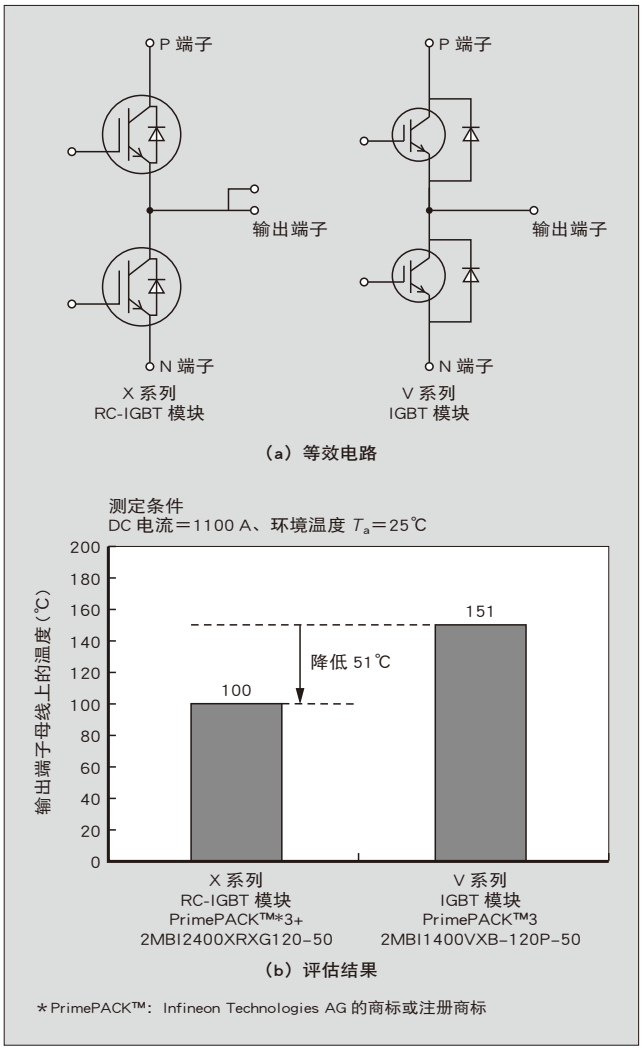



图 3　等效电路与端子温度评价结果

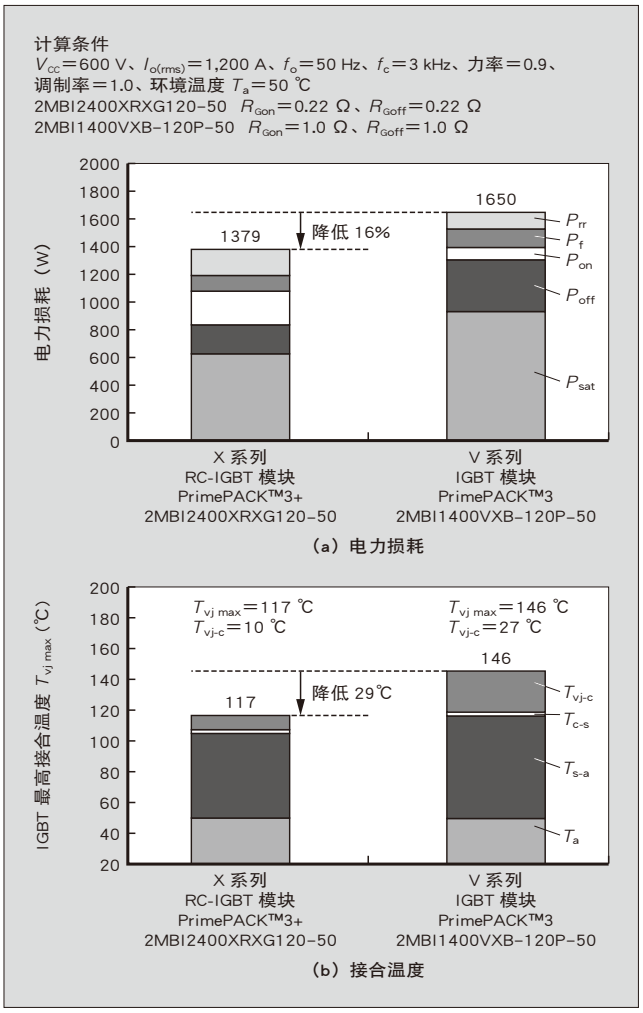



图 4　电力损耗和接合温度

的 V 系列 IGBT 模块相比，1100 A 通电时的端子温度降低了 51 ℃，可扩大额定电流。

⑶　搭载变频器时的功率损失和接合温度

**图 4** 所示为通过仿真求得的将传统 V 系列 IGBT 模块与 X 系列 RC-IGBT 模块搭载在电压型变频器上时的功率损失、接合温度 $T_{vj}$ 及结点 – 塑壳间温升 $T_{vj-c}$ 的结果。与 V 系列 IGBT 模块相比，在相同条件下功率损失减少了 16%。而且，通过 X 系列的封装技术与 RC-IGBT 技术的结合，大幅降低了热阻，$T_{vj-c}$ 降低了 17 ℃，从而使最高接合温度 $T_{vj\,max}$ 降低了 29 ℃。

⑷　功率循环耐量

**图 5** 所示为电机加减速等变频器在低频下工作时 $T_{vj}$ 的仿真结果。在传统的 IGBT+FWD 结构中，IGBT 及 FWD 分别反复进行发热及散热，1 个周期中 $T_{vj}$ 的最低温度与最高温度之差 $\Delta T_{vj}$ 为 90 ℃。另一方面，在将 IGBT 和 FWD 区域进行了单芯片化的 RC-IGBT 中，元件内的 IGBT 区域和 FWD 区域交替发热。因此，在 RC-IGBT 中，IGBT 产生的热也会传递到 FWD 区域，而 FWD 产生的热也会传递到 IGBT 区域，因此与 IGBT+FWD 结构相比，散热面积得到了扩大，热阻下降，$T_{vj}$ 的温度变化减小至约 1/4，1 个周期的 $\Delta T_{vj}$ 仅为 21 ℃。于是，对铝线接合部和硅芯片下

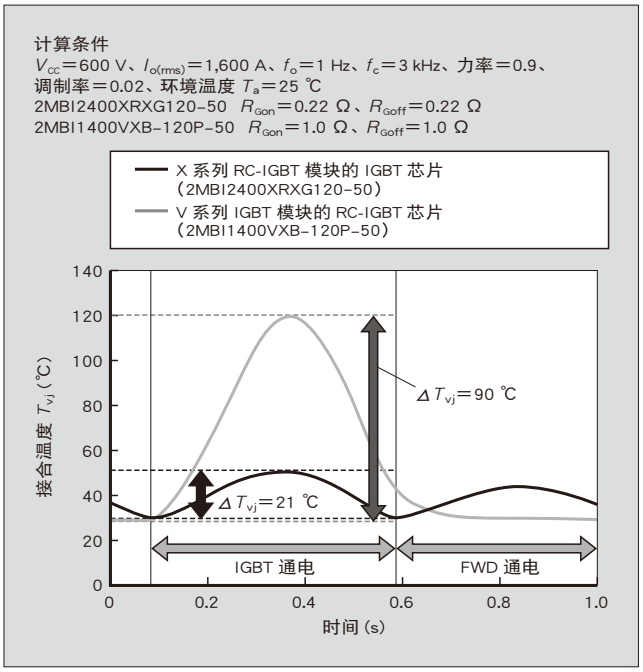



图 5　低频运行时的接合温度 $T_{vj}$ 的时间变化

焊锡接合部的热应力大幅缓和。

**图 6** 所示为 $\Delta T_{vj}$ 功率循环耐量与此次低频工作时的温

升计算结果。在 X 系列 RC-IGBT 模块中，因 $\Delta T_{vj}$ 大幅降低，所以低频工作时的 $\Delta T_{vj}$ 功率循环耐量从 $7\times10^4$cycles 增加到 $4\times10^9$cycles，可靠性得到了极大提高。另一方面，在与以往同等的功率循环耐量条件下使用时，有望实现高输出化。

⑸ 输出电流的提高

如**图 7** 所示，对连续工作进行仿真的结果表明，通过降低功率损失和热阻以及连续工作时的最高接合温度可从 V 系列 IGBT 模块的 150 ℃提高至 X 系列 IGBT 模块的 175 ℃，可在同一封装的情况下将输出电流扩大 55%。

另外，如**图 8** 所示，仿真了变频器在额定输出电流的 100% 下连续工作后，以 200% 进行了 3 秒过载工作时的 100% 输出电流 $I_O$ 和 $T_{vj\ max}$。结果表明，如**图 9** 所示，通过使用 X 系列 RC-IGBT 模块，即使在过载工作中输出电流也能扩大 54%。

**图 10** 所示为连续工作时的 $I_O$ 与 $T_{vj\ max}$ 仿真结果。需要并联 2 个 1400 A V 系列 IGBT 模块时，可更换为 1 台 2400 A X 系列 RC-IGBT 模块，不仅可扩大 17% 的输出电流，还可节省空间。

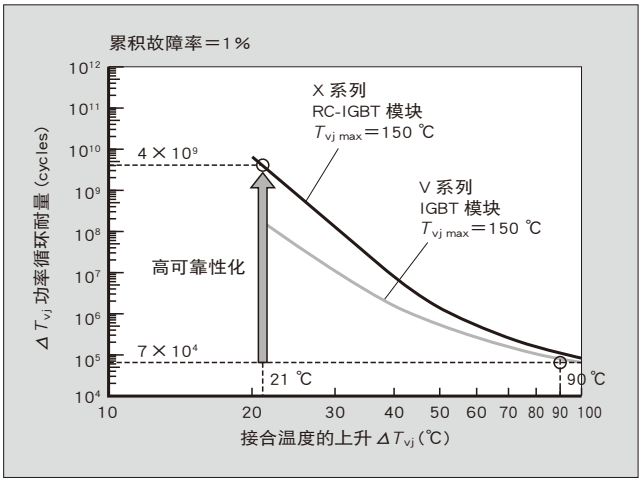



**图 6　$\Delta T_{vj}$ 功率循环耐量**

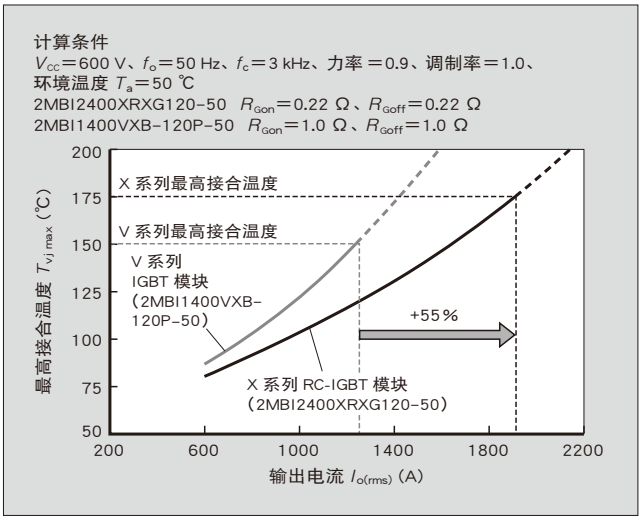



**图 7　连续运行时的最高接合温度**

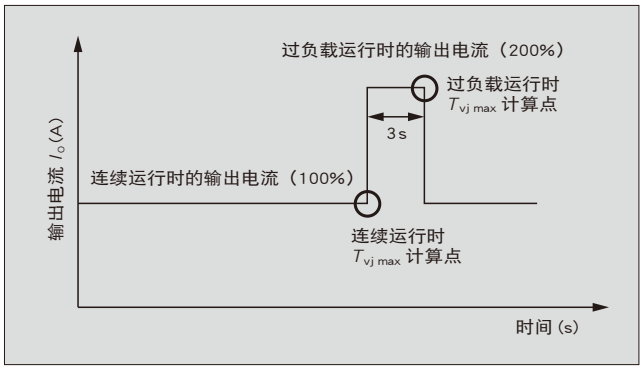



**图 8　变频器过负载时的运行类型**

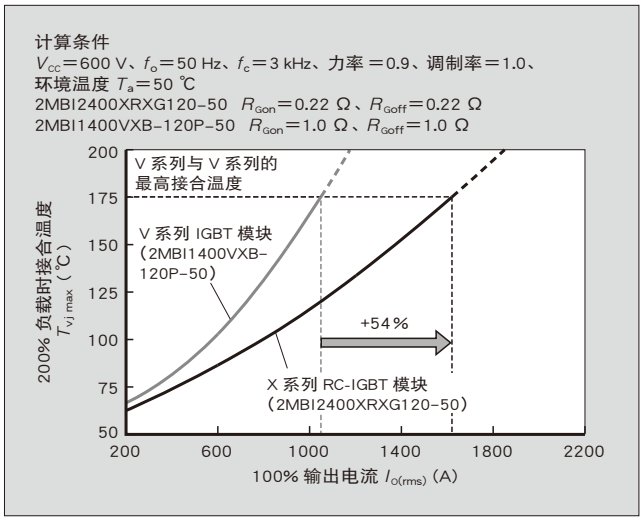



**图 9　过负载运行时的最高接合温度**

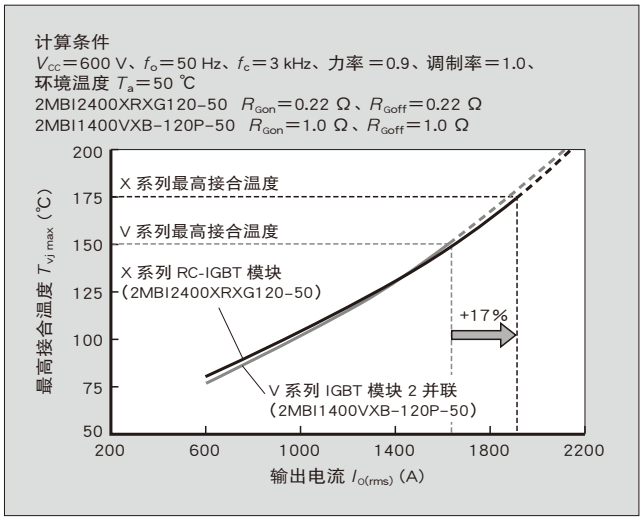



**图 10　连续运行时的最高接合温度**

## 5　后记

以上，对第 7 代“X 系列”产业用 1200V/2400A RC-IGBT 模块进行了论述。通过在电力转换装置上搭载该模块，实现了迄今为止难以实现的输出电流扩大结果，可进一步为电力转换装置的小型化、高效化、高可靠性化和低成

本化做出贡献。

今后，富士电机仍将继续推进 IGBT 模块的技术革新，为实现安全放心且可持续发展的社会做出贡献。

**参考文献**


⑴ 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 山野彰生等. 第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT 模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.23-27.

⑹ 山野彰生等. 第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT 模块的系列化. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C10, no.1, p.20-23.

⑺ Yamano, A. et al. “The Series of 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2018.

⑻ Yamano, A. et al. “1,700V 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Europe 2019.

**挂布　光泰**

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产业事业部产业模块部。

**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产业事业部产业模块部。

**平田　朋也**

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产业事业部产业模块部。

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。