现状与展望

功率半导体的现状与展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

藤平 龙彦 FUJIHIRA, Tatsuhiko　宫坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi　井川 修 IKAWA, Osamu

1 引言

随着人口与经济的增长，全球的能源消耗量日益增加。国际社会通过了可持续发展目标 SDGs 和全球变暖对策的国际框架《巴黎协定》，为兼顾经济增长和社会与环境课题的解决，作为社会中的一员，企业也需要采取积极行动。

富士电机也在根据《巴黎协定》制定的日本全球气候变暖对策计划等基础上，制定了包括“实现低碳社会”、“实现循环型社会”、“实现自然共生社会”在内的环境展望 2050，整个供应链一起致力于解决社会与环境课题。在所采取的举措当中，功率半导体是创造能源稳定供应、自动化、节能等重要价值的产品。

一直以来，富士电机都致力于能源技术的革新。作为能够稳定且最高效利用能源的电力电子设备，功率半导体扮演着关键的角色，富士电机积极开发并推出了功率半导体产品。近年来，为抑制 CO_2 排放量，实施全球气候变暖对策，除了迅猛发展的节能化外，各国还希望扩大太阳能发电和风力发电等可再生能源，并且在今后数十年内禁止汽油车和柴油车的销售，引进电动汽车（xEV），从而实现低碳化，最终实现无碳化。为此，富士电机将通过推出适应以上需求的产品，进一步对社会做出贡献。

2 富士电机的功率半导体

富士电机开发了面向各种用途的功率半导体产品。**图 1** 是富士电机的功率半导体产品的应用示例。

针对小容量市场，富士电机开发了空调等家电产品的电机驱动用小容量 IPM(*1)（Intelligent Power Module）以及基于住宅用空调技术、实现了 xEV 所需性能的汽车空调用 IPM。此外，还开发了用于功率调节器（PCS：Power Conditioning System）、不间断电源装置（UPS：Uninterruptible Power System）等以电力转换为主要用途的分立器件(*2)IGBT(*3)（Insulated Gate Bipolar Transistor）和用于各种设备的电能转换单元的 SJ-MOSFET(*4)（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）产品。在 SJ-MOSFET 产品方面，不仅开发了工业用途的产品，还开发了用于发动机、传动装置和制动器等控制用途，以及 xEV 充电器的电力转换和控制用途的产品。另外，为控制以 LED 照明为首的各种电子设备的开关电源，开发了电源 IC 产品。同时，还开发了用于汽油车的进气系统、排气系统、发动机、传动装置、动力转向装置、制动器等油压控制单元的压力传感器、用于汽油发动机点火控制的单芯片点火器。

面向中容量市场，开发了通用变频器用途、机床和机

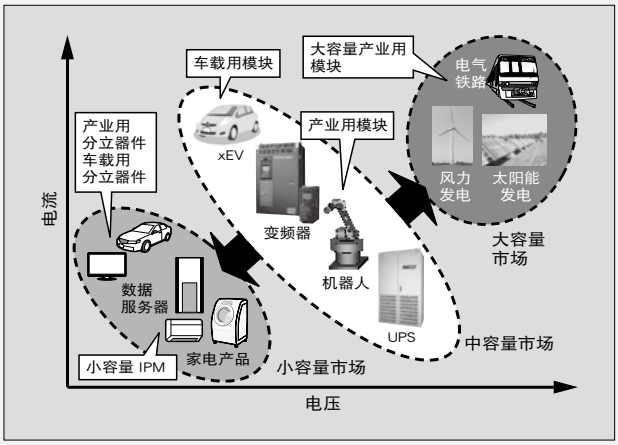

图 1　富士电机的功率半导体产品的应用示例

（*1）IPM

Intelligent Power Module 的简称。是一种除功率半导体元件之外，还内置了驱动电路、保护电路的功率模块。除了能够减轻电路设计的负担，通过采用专属的驱动电路还能够最大限度地发挥功率半导体元件的性能。

（*2）分立器件

由被称为 1 in 1 电路所组成的功率半导体，该电路由 1 个 IGBT 或 MOSFET 的功率半导体元件，以及插入并与其构成反向并联的二极管所组成。形状采用了通用的引脚布局，有 TO-220 及 TO-3P 等。被用于小容量型的 PC 电源、不间断电源装置、液晶显示器及小型电机的控制电路等。

（*3）IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor 的 简称。栅极部和 MOSFET 的结构相同，是具有用绝缘氧化膜绝缘的栅极电压控制型器件。是一种发挥了 MOSFET 和双极晶体管长处的器件。由于是双极运行因而能进行传导率调制，所以兼顾了应用于变频器时所需的足够的开关速度、高耐压性和低导通电阻。

（*4）MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor 的简称。一种场效应晶体管，是具有用氧化绝缘膜绝缘的栅极部的电压控制型器件。是 LSI 中最常见的结构。由于是单极型器件，因而能够实现高速运行，但与提高耐压相应的，导通电阻也会上升，因此被用作低耐压、高频率的器件。相对于栅极位于器件表面、沟道与器件面平行的平面型 MOSFET，沟槽型 MOSFET 在器件上形成沟槽并将栅极嵌入沟槽内，沟道与器件面垂直。

器人的伺服电机控制用途、商用空调的电机控制用途、用于 UPS 电力转换等工业级 IGBT 模块，以及用于 xEV 的电机控制的汽车级 IGBT 模块等产品。

面向大容量市场，开发了太阳能发电和风力发电等可再生能源的各种电力转换，铁道车辆电动机的可变速驱动装置用 IGBT 模块等产品。

另外，针对各种用途，也在开发与 Si 器件相比，具有耐高温、低损耗、高耐压等优良特性的碳化硅（SiC）(*5) 器件，以及组合了 Si-IGBT 和 SiC-SBD (*6)（Schottky Barrier Diode）的 SiC 混合模块等产品。

3 功率半导体的开发情况

以下，关于**第 2 章**所述富士电机开发的功率半导体，对其最新开发进展进行简单介绍。

3.1 第 7 代“X 系列”IGBT-IPM

富士电机开发出第 7 代“X 系列”的半导体芯片与封装，推出了低损耗、高可靠性的 IGBT 模块产品。IPM 是在一个 IGBT 模块中内置驱动功能和保护功能的产品。因为可以在预设的最佳条件下驱动 IGBT，所以能减轻驱动电路和保护电路的设计负担。富士电机在业内首次推出内置 IGBT 芯片过热保护和报警原因识别功能的 IPM 产品，来应对 IPM 高性能化和高可靠化等要求。为满足变频器进一步小型化、低损耗、高性能的要求，新开发了第 7 代“X 系列”IGBT-IPM（X 系列 IPM）。

X 系列 IPM 采用 RC-IGBT (*7)（Reverse Conducting-IGBT）技术，新推出了在冷却器上的设置面积比原来的最小封装缩小 27%，以及相同的电流容量下，在冷却器上的设置面积比传统产品缩小 54% 的新封装产品。另外，原来的第 6 代产品“V 系列”IPM[1]，额定电压为 600 V 的产品其电流最大到 400 A，额定电压为 1200 V 的产品其电流最大到 200 A，但 X 系列 IPM，额定电压为 650 V 的产品其最大电流可到 450 A，额定电压为 1200 V 的产品其最大电流扩大到了 300 A。

X 系列 IPM 通过第 7 代 IGBT 芯片技术与外围驱动控制电路技术的组合，与传统产品 V 系列 IPM 相比，损耗可减少大约 7% 以上（**图 2**）。另外，通过第 7 代封装技术的应用和控制电路的改善，将连续工作时的芯片接合温度 T_{vjop} 的范围从 125 ℃以下扩大至 150 ℃以下。通过这些技术，输出电流可增加约 31%。此外，还业内首创内置了 IGBT 芯片过热状态的外部温度报警功能，可以将 IGBT 芯片过热状态作为警报通知外部（参照 12 页，“第 7 代 X 系列 IGBT-IPM”）。

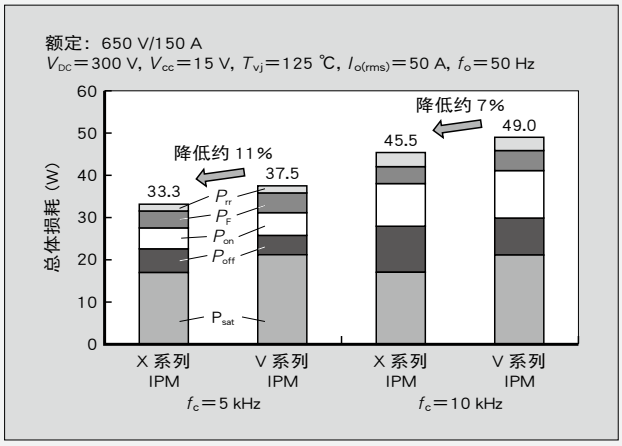

图 2 产生损耗仿真的比较

3.2 第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET

作为下一代功率半导体材料，SiC 备受期待。SiC 的绝缘损坏耐量约为 Si 的 10 倍，因此可在确保器件高耐压的同时，通过薄化和漂移层的高浓度掺杂，可降低导通损耗。并且，通过采用 MOSFET，可降低开关损耗，实现高速开关。通过发挥 SiC 器件的以上优异特性，可得到比 Si-IGBT 体积小且功率密度大的模块。

在发挥 SiC 器件优异特性的基础上，富士电机开发了针对中小容量市场的产品和配电设备等大容量带的产品[2],[3]。面向这些产品，SBD 和平面型 MOSFET、SiC 沟槽型栅 MOSFET 已在量产。比平面型 MOSFET 阈值电压高和导通电阻低的第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 已开始量产，性能优于第 1 代的第 2 代 SiC 沟槽型 MOSFET 也已开发完成。将额定电压为 1200 V 的产品比较后发现，在相同栅极阈值电压下，与第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 相比，第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的单位面积导通电阻降低了约 23%（**表 1**）。此外，利用独创的技术，可

表 1 第 1 代与第 2 代 SiC 槽型栅 MOSFET 的特性比较

项目	第 2 代	第 1 代
导通电阻（以第 1 代为 1）	0.77	1.00
栅极阈值电压	5.0V	5.1V
栅极推荐驱动电压	+15V/−3V	+20V/−3V
栅极绝对最大额定电压	+20V/−7V	+25V/−7V

(*5) SiC

硅（Si）和碳（C）的化合物。存在 3C、4H、6H 等多种结晶结构的多种形态，根据不同的结构，具有 2.2 ～ 3.3 eV 的带隙，作为一种宽禁带半导体被人们所熟知。由于具备高绝缘损坏电压和高热传导率等对功率器件而言有利的物性，因此作为一种可实现高耐压、低损耗、高温运行的器件，其实用化在不断发展。

(*6) SBD

Schottky Barrier Diode 的简称。利用因金属和半导体的接合而产生的肖特基势垒、具有整流作用的二极管。由于电气特性优秀，已经开始研究将其应用到 SiC-SBD 的 FWD 中。和同时利用少数载流子的 PiN（P-intrinsic-N）相比，仅靠多数载流子运行的 SBD 的反向恢复速度快，反向恢复损耗小。

(*7) RC-IGBT

Reverse-Conducting（逆导通）IGBT 的简称。在模块中将成对使用的 IGBT 和 FWD 整合在一颗芯片中的元件。由于是 IGBT 部和 FWD 部交替运行，因此散热性优异，可减少模块内的芯片数目，因此有助于实现 IGBT 模块的小型化及提升功率密度。

防止因向体二极管通电而导致的导通电阻上升，提高了可靠性（参照 17 页，“第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET”）。

3.3 搭载有第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块

富士电机对具有上述优异 SiC 特性的模块进行了产品化。2014 年，针对兆瓦级太阳能用 PCS 的升压电路，开发了搭载平面型 MOSFET 的全模封装斩波模块。此后，也在继承该封装概念的基础上开发新结构封装，开发了搭载第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的模块产品[2),(4),(5)]。此次，为更加灵活地应对电力电子设备，开发出了在与传统 Si-IGBT 模块具有相同外形的端子配置的封装中搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的产品。如果将此次开发的 62 mm 宽的 Si-IGBT 兼容封装产品代替 Si-IGBT 产品安装在变频器上，损耗会降低 78%。而且，在芯片温度相同的情况下，输出电流可增大至约 2 倍。此次，产品阵容计划小容量带为 Small 1B、Small 2B 封装，中容量带为 62 mm 封装，大容量带为 HPnC 封装，并将使 All-SiC 模块可灵活地应用于电力电子设备上（**表 2**）（参照 21 页，“搭载有第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块）”。

3.4 汽车空调用 IPM

富士电机的家用空调用小容量 IPM，同时实现了高节能、小型化、低干扰及高可靠性。与家用空调相比，汽车空调虽然空调容积小，但车辆的隔热性能低，因此空调系统的压缩机负荷并不小。汽油车压缩机的驱动是通过发动机进行的。近年来销量迅速增长的 xEV，其压缩机的驱动是通过耗电量达数 kW 的马达进行的。因此，压缩机驱动用马达直接连接在与行驶用电池相同的高压电池上，需要其具有高节能性。而且，因压缩机及变频器电路安装在距离乘客较近的位置，需要降低噪音和振动，所以汽车空调用 IPM 需要支持高输出频率和高载波频率驱动。另外，还需要确保包括车辆控制用计算机的干扰控制在内的安全性。此次，以面向家用空调及工业变频器开发的第 2 代小容量 IPM[6)]为基础，开发了可实现上述 xEV 用器件所要求性能的汽车空调用 IPM。为降低 IGBT 的导通损耗，进一步抑制了 IGBT 及 FWD[(*8)]（Free Wheeling Diode）关断时的浪涌电压，使降低开关干扰和降低损耗得以兼顾。**图 3** 所示为 FWD 的关断浪涌电压和关断损耗的均衡特性。在关断损耗大致相同的情况下，关断浪涌电压降低了 53%。并且，为确保汽车级品质，对封装也进行了优化设计（参照 25 页，“汽车空调用 IPM”）。

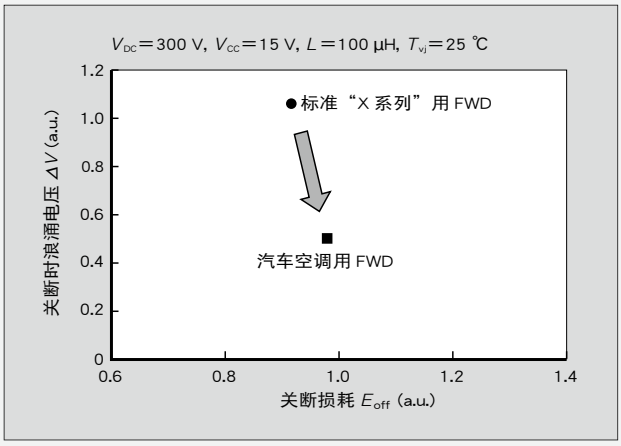

图 3　FWD 关断时浪涌电压与关断损耗的均衡特性

3.5 xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术

富士电机正在开发面向 xEV 行驶电机驱动用变频器的模块。此前，已经利用集成了 IGBT 与 FWD 的 RC-IGBT 和铝制直接水冷模块等，开发了小型的高电流密度模块[7)]。此次，开发了电力密度比传统产品更高的第 4 代铝制直接水冷结构（**图 4**）产品。第 4 代铝制直接水

表 2　Si-IGBT 兼容封装 All-SiC 模块的产品阵容

项目		封装类型	Small 1B	Small 2B	62mm STD	HPnC
		外形尺寸 W×D×H (mm)	62.8×33.8×12.0	56.7×62.8×12.0	62.0×108.0×30.5	100.0×140.0×38.0
额定电压	MOSFET 代别	等效电路				
1200V	第 2 代 沟槽型栅	2 in 1	～ 100A	～ 200A	～ 600A	—
		6 in 1	～ 50A	～ 100A	—	—
1700V	第 2 代 沟槽型栅	2 in 1	—	—	～ 400A	～ 1000A
3300V	第 1 代 沟槽型栅	2 in 1	—	—	—	～ 750 A

(*8) FWD

Free Wheeling Diode 的简称。也叫回流二极管。在变频器等的电力转换电路中与 IGBT 并联，充当 IGBT 关断时将积累在电感器中的能量回流到电源侧的角色。对于 Si 的 FWD，PiN 二极管是主流。由于是同时利用了少数载流子的单极型，因此电流沿正向流通时的电压下降可保持在较小范围，但相应地，反向恢复损耗变大。

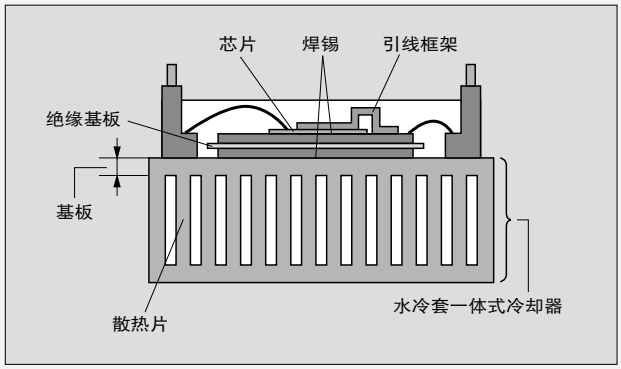

图 4　第 4 代铝制直接水冷结构

冷结构继承了第 2 代所采用的散热器与水冷套一体化结构。将第 3 代所采用的二维流路形状变更为三维流路形状，可提高冷却水的流速，优化底板厚度，使芯片到冷却水之间的热阻降低 10%。并且，通过使用导电率高的铜引线框架代替传统的铝配线，减小了安装面积。此外，在引线框架结构中，利用高热传导率和大接合面积，可通过结合面的热扩散效果降低芯片温度。采用这些技术的第 4 代铝制直接水冷结构，与第 3 代结构相比，单位体积的电力密度可提高 36%（参照 29 页，“xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术”）。

3. 6　面向 xEV 的 DC/DC 转换器用模块

除 3.5 节所示的行驶电机驱动用变频器外，xEV 还搭载了 DC/DC 转换器等电力转换装置，代替汽油车中以发动机为原动力发电至电装部件用的交流发电机。该 DC/DC 转换器进行电压的转换，可从高压主电池输出至电装部件供电用的低电压电池。使用通过工业级小容量模块[8]孕育的技术，富士电机开发了面向 xEV 的 DC/DC 转换器用模块（**图 5**）。由分立器件产品构成的传统 DC/DC 转换器使用绝缘片使高压电池与车身绝缘。本模块内置了该绝缘功能和多个半导体器件。由此，可进行高密度实装。此外，在次级侧 SBD 中，为防止浪涌电压引起的损坏，

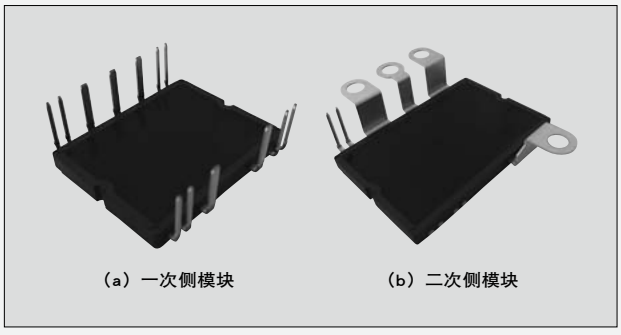

图 5　DC/DC 转换器用模块

传统产品需要另加浪涌钳位电路。本产品改良了耐压结构，作为开关时浪涌电压耐量替代特性的反向恢复损坏耐量的容许电流峰值提高至原来的约 3 倍，所以无需另加浪涌钳位电路。利用这些技术，DC/DC 转换器的系统尺寸安装面积减少了 40 %（参照 34 页，“面向 xEV 的 DC/DC 转换器用模块”）。

3. 7　1200 V 分立器件 IGBT “XS 系列”

太阳能发电等可再生能源的扩大导致电力转换需求增大，信息通信系统的发展导致全球数据使用量增加，在这样的社会背景下，对 PCS 和 UPS 的需求不断增大。对这些设备而言，降低能源损耗是一项重要课题，因此，对于这些设备中所用的半导体开关器件，也要求有很高的效率。为满足这些要求，富士电机开发并量产了与传统产品“High-Speed W 系列”相比效率得到改善的 650 V 耐压分立器件 IGBT “XS 系列[9]”。此次，还新开发了 XS 系列的 1200 V 耐压的产品。XS 系列是以第 7 代 IGBT 及 FWD 技术为基础，针对分立器件进行了优化设计的产品，此次开发的 1200 V 耐压产品相对于传统产品 High-Speed W 系列，导通损耗 VCE(sat) 降低了 0.55 V，均衡特性改善了 20% 以上（**图 6**）（参照 38 页，“1200 V 分立器件 IGBT “XS 系列”）。

3. 8　第 4 代 LLC 电流谐振 IC “FA6C00 系列”

在用于电子设备、输出电压为 75 ～ 300 W 级别的开关电源中，广泛使用了对电源的高效化和低干扰化有效的 LLC 电流谐振电路。随着 IoT（Internet of Things）的发展，很多电子设备被连接到了互联网上，其功耗也随之变大。在这种背景下，电源也要求降低功耗，不仅在待机时需要降低功耗，还需要在轻负载时提高效率。富士电机为 LLC 电流谐振电路开发了各种控制 IC[10]～[12]。此次，除了抑制原来的待机电力外，还开发了可改善轻负载效率

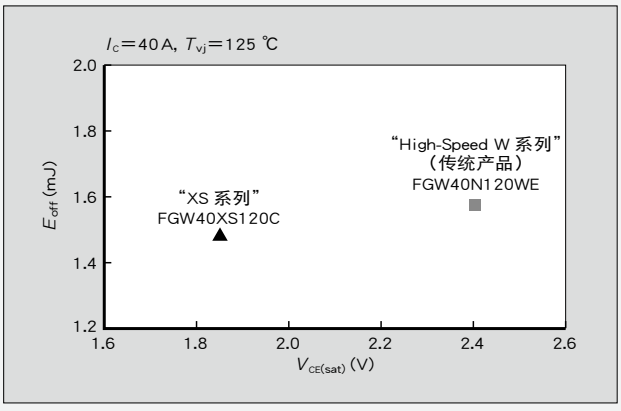

图 6　1200V “XS 系列”的均衡特性

（＊9）噪声

IC 的控制频率在可听范围内时，构成电源的变压器和电容器等无源器件发出声音的现象。

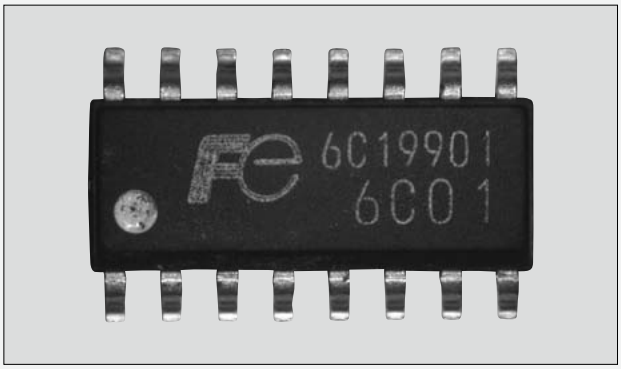

图 7 “FA6C00 系列”

和削减电源部件的“FA6C00 系列”(**图 7**)。使用传统技术时，如果要提高效率，则会出现变压器噪声变大(*9)的问题。FA6C00 系列在连续开关控制中新采用高频突发脉冲控制技术，在抑制电机噪声的同时，还使轻负载时的效率提高了约 10%。此外，在输出电压控制中新采用谐振电流相位比控制，可从传统产品中削减 7 个相位补偿电路部件，有助于降低电源系统的成本 (参照 42 页、“第 4 代 LLC 电流谐振 IC ‘FA6C00 系列’ ”)。

3. 9 第 7 代汽车级高压传感器

为降低环境负荷，xEV 得到了大力推广，另一方面，汽油车和柴油车等内燃机汽车的节能减排也非常重要。压力传感器用于进气系统、排气系统、传动装置的液压监视器等，有助于节能。富士电机致力于开发汽车级压力传感器，推出了用于吸气系统和排气系统的低压传感器和用于油压控制单元的高压传感器，为降低环境负荷做出了贡献。作为高压传感器，引擎油压用第 6.5 代压力传感器[13]已开始量产。此次，富士电机开发了用于传动装置和制动器等油压控制系统的第 7 代汽车级高压传感器。封装采用不锈钢隔膜方式，另外，新开发了双栅极 MOS 晶体管，进行高耐压化，降低高温时的特性误差 (**图 8**)，实现了 150℃下的动作保证、高精度控制化和基于小型化的高安装密度化 (参照 48 页，“第 7 代汽车级高压传感器”)。

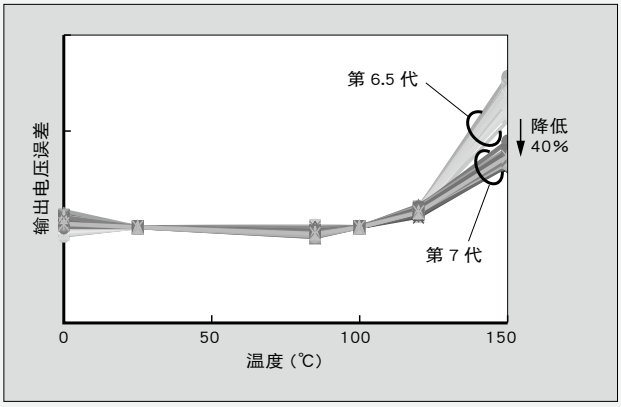

图 8 第 7 代汽车级高压传感器中的输出误差特性

4 后记

本文对富士电机在功率半导体开发方面的最新成果进行了简单介绍。自创业以来，富士电机始终致力于能源技术的革新，将“通过能源、环境技术的革新，为实现安全安心、可持续发展的社会做出贡献”作为经营方针之一。当前，社会对节能化、低碳化、无碳化等环境问题的关注日益高涨，电力电子正是应对上述问题的关键技术。功率半导体是电力电子中的关键器件，今后，本公司会继续通过技术革新，为实现安全、安心、可持续发展的社会做出贡献。

参考文献

⑴ 清水直樹ほか. インテリジェントパワーモジュール「V シリーズ IPM」. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.384-388.
⑵ 中泽将刚等 . 搭载有 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块 . 富士电机技术期刊 . 2018，vol.C10，no.1，p.3-6.
⑶ 金井直之等 . 面向配电设备的搭载有沟槽型栅 MOSFET 的 3.3kV All-SiC 模块 . 富士电机技术期刊 . 2019，vol.C11，no.1，p.23-27.
⑷ 蝶名林干也等 . All-SiC 2 in1 模块 . 富士电机技术期刊 . 2017, vol.C9, no.1, p.7-10.
⑸ Iwasaki, Y. et al. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package” proc. PCIM Europe 2017.
⑹ 荒木龙等 . 第 2 代小容量 IPM. 富士电机技术期刊 . 2016, vol.C8, no.1, p.20-23.
⑺ 佐藤宪一郎等 . 搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化 . 富士电机技术期刊 . 2017, vol.C9, no.1, p.37-40.
⑻ 山田忠則ほか. インバータエアコン用小容量 IPM. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.430-434.
⑼ 原幸仁等 . 650V 分立器件 IGBT “XS 系列” . 富士电机技报 . 2019, vol.C11, no.1, p.42-45.
⑽ 山田谷政幸ほか. LLC 電流共振制御 IC「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.
⑾ 陈建等 . 第 2 代 LLC 电流谐振控制 IC “FA6A00N 系列” . 富士电机技报 . 2014, vol.C6, no.1, p.18-22.
⑿ 园部孝二等 . 高效电源用临界模式 PFC 控制 IC “FA1A60N” 和 LLC 电流谐振控制 IC “FA6B20N” . 富士电机技术期刊 . 2017, vol.C9, no.1, p.49-54.
⒀ 佐藤荣亮等 . 第 6.5 代车载用高压传感器 . 富士电机技术期刊 . 2019, vol.C11, no.1, p.46-50.

藤平 龙彦
从事电子元件的研究开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部部长。工学博士。电气学会会员、应用物理学会会员、日本金属学会会员、IEEE 会员。

宫坂　忠志

从事电子元件事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部电装事业部部长。电气学会会员。

井川　　修

从事电子元件的事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部部长。工学博士。电气化学会会员。

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。