车载用第 2 代 SJ-MOSFET “Super J MOS S2A 系列”

2nd-Generation SJ-MOSFET for Automotive Applications “Super J MOS S2A Series”

田平 景辅 TABIRA, Keisuke　新村 康 NIIMURA, Yasushi　皆泽 宏 MINAZAWA, Hiroshi

为响应混合动力汽车等环保汽车降低油耗，以及电力转换设备小型化的要求，功率 MOSFET 需要小型、低损耗、低干扰的产品。富士电机采用超结结构，开发出实现了低导通电阻、低开关损耗的车载用 “Super J MOS S1A 系列”，并投入量产。此次，富士电机又开发出降低了导通损耗，且改善了开关损耗与关断时跳变电压间的均衡关系的车载用第 2 代 SJ-MOSFET “Super J MOS S2A 系列”。本产品可为电力转换设备的高效化和小型化做贡献。

There has been increasing demand for smaller power conversion equipment and better fuel efficiency in eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicles. Accordingly, power MOSFET products are being required to be compact, low loss and low noise. Fuji Electric has developed and launched the “Super J MOS S1A Series,” a product for automotive applications that adopt a superjunction structure characterized by their low on-state resistance and low switching loss. More recently, Fuji Electric has developed the 2nd-Generation SJ-MOSFET for automotive applications “Super J MOS S2A Series,” which reduces conduction loss while improving the trade-off between switching loss and jumping voltage during turn-off switching. The use of this product contributes to size reduction and enhanced efficiency of the power conversion equipment for automotive applications.

1 引言

近年来在汽车市场中，受愈发严格的环境法规以及用户环保意识提高的影响，以混合动力汽车（HEV）、充电式混合动力汽车（P-HEV）、电动汽车（EV）为代表的环保汽车备受关注。高效利用这些车种上搭载的电池的电力，直接关系到油耗的降低，因此，电力转换技术（电力电子技术）的重要性不断增加。另外，为了拓宽汽车车内的空间，提升搭乘者的舒适性，也强烈要求车载用电力转换设备小型化。因此，车载用 DC/DC 转换器、充电器等电力转换设备面临着小型、高效率、低干扰的要求。这些电力转换设备上使用的功率 MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）等半导体开关元件，也要求具备小型、低损耗、低干扰的特性。

为响应这些要求，富士电机在 2011 年开发出了采用超结结构、实现了低导通电阻和低开关损耗的第 1 代 “Super J MOS S1 系列”[(1)~(3)]，又在 2014 年开发出了车载用分立器件产品 “Super J MOS S1A 系列”（S1A 系列），并将其产品化。

本稿将对相比 S1A 系列降低了导通损耗，且抑制了关断时漏极 - 源极间电压 V_{DS} 跳变（V_{DS} 浪涌电压）的车载用第 2 代 SJ-MOSFET “Super J MOS S2A 系列”（S2A 系列）进行介绍。

2 设计理念

图 1 展示了车载用充电器 PFC 电路中，功率 MOSFET 产生的损耗的详情。功率 MOSFET 产生的损耗，大致可分为导通损耗 P_{on} 以及开通损耗 P_{ton}、关断损耗 P_{toff} 等开关损耗。为提升电力转换设备的电力转换效率，必须同时降低导通损耗和开关损耗。降低导通电阻可有效降低导通损耗，而提升开关速度可有效降低开关损耗。但如果为了降低开关损耗而提高关断侧的开关速度，则关断时的 V_{DS} 浪涌电压会增大，从而会导致栅极振动、引发误导通。

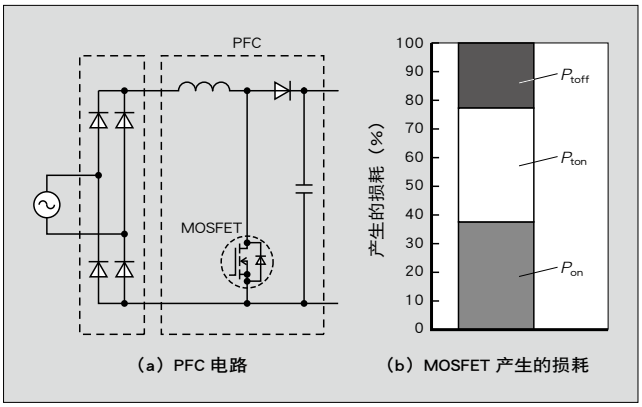

图 1　充电器 PFC 电路部中 MOSFET 产生的损耗

因此，S2A 系列的目标是相比 S1A 系列，降低单位面积的导通电阻 $R_{on}\cdot A$，从而降低导通损耗，以及在不增加开关损耗的前提下，抑制 V_{DS} 浪涌电压，改善均衡关系。

3 特点

3.1 降低导通损耗

降低导通电阻可有效降低导通损耗，因此，S2A 系列致力于降低 $R_{on}\cdot A$ 的研究。

S1A 系列和 S2A 系列中适用的超结结构，通过交替配置漂移层 n 区和 p 区，形成了以整个漂移层确保耐压的结构。因此，即使和传统的平面型耐压相同，也能够提高漂移层 n 区的杂质浓度，大幅降低 $R_{on}\cdot A$（**图 2**）[(4)~(8)]。

S2A 系列相比 S1A 系列，通过提升杂质扩散工艺方面的技术，使 n 区的杂质保持较高的浓度，从而降低了

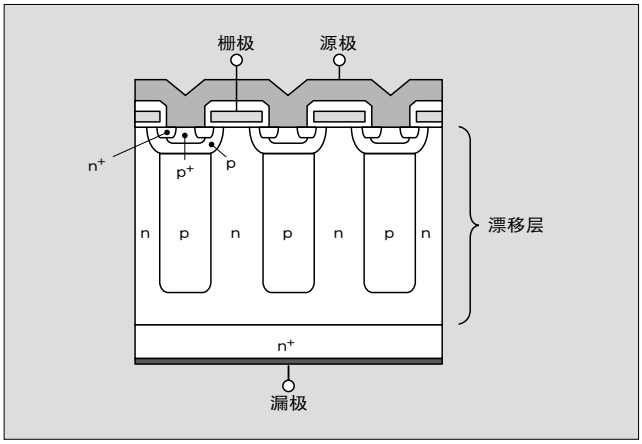

图 2　超结结构

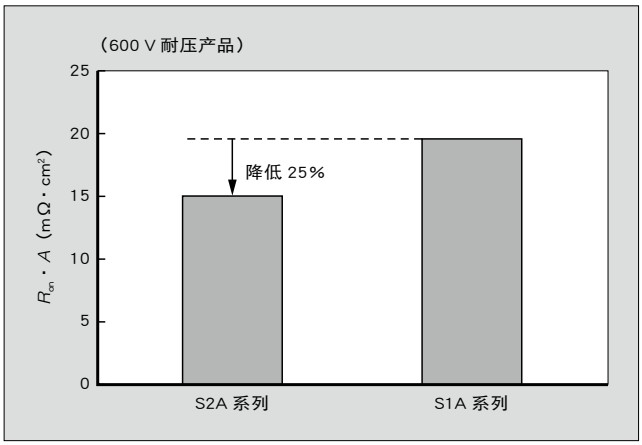

图 3　单位面积的导通电阻 R_{on}・A

漂移层的电阻值，实现了 R_{on}・A 的进一步降低[9],[10]。**图 3** 展示了 600 V 耐压的 S1A 系列和 S2A 系列 R_{on}・A 的比较。S2A 系列的 R_{on}・A 为 15 mΩ・cm²，相比 S1A 系列的 20 mΩ・cm²，降低了 25%。

3.2　抑制 V_{DS} 浪涌电压

正如**第2章**中所述，开关损耗的降低和 V_{DS} 浪涌电压的抑制存在均衡关系，改善这一关系是我们面临的课题。S2A 系列在不增加开关损耗的前提下，抑制 V_{DS} 浪涌电压，改善了均衡关系。

在设计电源基板的电路图时，经常会出现沿用过去电源基板的图案设计，或受部件布局等的制约，无法设计出理想的电路图的情况。此时，若仅更换使用的 MOSFET，当电路上的电感较大，且驱动条件和电路常数不适当时，V_{DS} 浪涌电压就会增大，因此，受开关时栅极振动的影响，会发生误导通。

例如，我们使用斩波电路，对 S1A 系列和 S2A 系列进行了比较。为方便比较，我们没有结合使用的 MOSFET，对这一电路的驱动条件和电路常数进行优化。**图 4** 分别展示了两个系列的关断波形。S1A 系列 V_{DS} 浪涌电压增大，发生了误导通〔**图 4**(a)〕。

另外，车载用的电力转换设备搭载于引擎室中，因此，多在高温下使用，并且，阈值电压 $V_{GS\,(th)}$ 具有负温度特性，

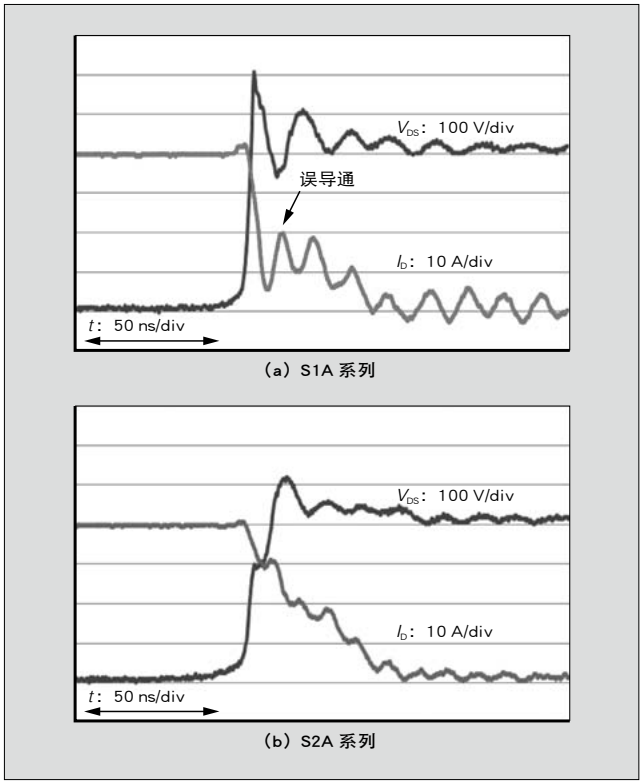

图 4　关断波形（外置栅极电阻 R_g：2 Ω）

因而容易受到栅极振动的影响，预计容易发生误导通。要抑制误导通，可以提升 $V_{GS\,(th)}$，但若仅提升 $V_{GS\,(th)}$，关断时 V_{DS} 浪涌电压会增大，则可能会发生栅极振动导致的误导通。

S2A 系列中通过优化 $V_{GS\,(th)}$，以及在芯片中内置栅极电阻 R_g 等，不仅提升了 $V_{GS\,(th)}$，还同时抑制了 V_{DS} 浪涌电压，从而抑制误导通的发生〔**图 4**(b)〕。

图 5 中展示了使用斩波电路评估的外置栅极电阻 R_g 和 V_{DS} 浪涌电压的特性。R_g 较小时，S2A 系列可比 SA1 系列更有效地抑制 V_{DS} 浪涌电压。另外，如**图 6** 所示，在相同 V_{DS} 浪涌电压下，S2A 系列比 S1A 系列的关断损耗 E_{toff} 更小，E_{toff} 和 V_{DS} 浪涌电压的均衡关系得到了改善。

如上所示，通过抑制 V_{DS} 浪涌电压，在把过去使用的 MOSFET 更换为新 MOSFET 时，客户无需变更电路图或大幅变更部件数量，就可简单地设计出高效的电源。

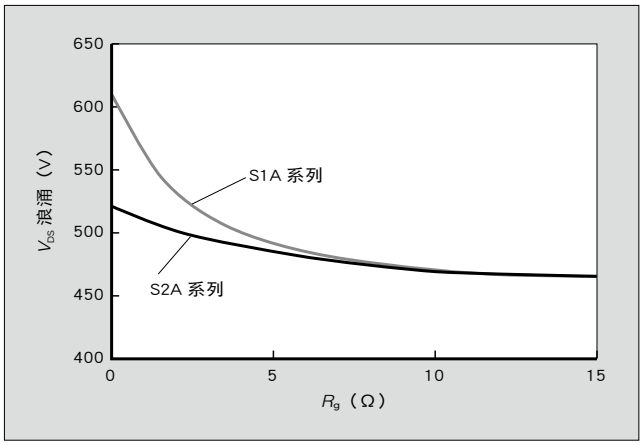

图 5　外置栅极电阻 R_g 和 V_{DS} 浪涌电压的特性

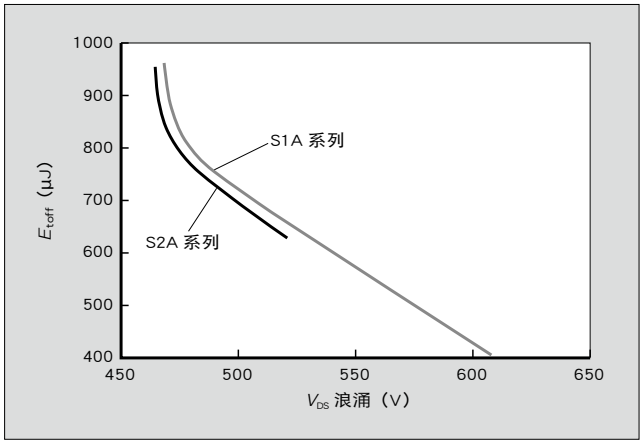

图 6　关断损耗 E_{toff} 和 V_{DS} 浪涌电压的均衡特性

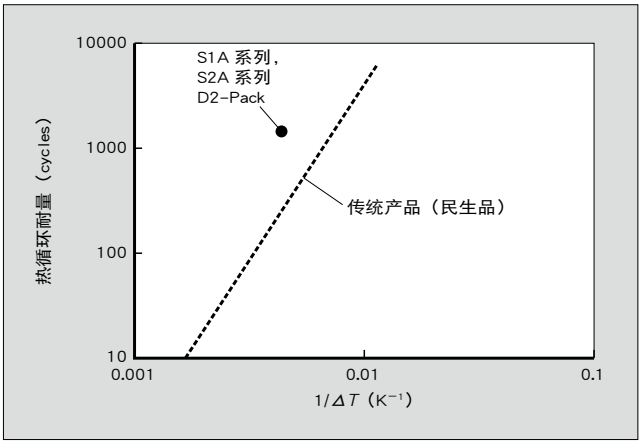

图 8　热循环耐量

此外，元件耐压的选择性更多，可使用比旧产品更低耐压的元件，即导通电阻更低的元件。因此，除了 S1A 系列 600 V 耐压和 650 V 耐压的产品，S2A 系列还推出了 500 V 耐压和 400 V 耐压的产品，并加入到系列之中。

3.3　降低轻负载时的损耗

为延长电池寿命，车载用 DC/DC 转换器在整个生命周期内，大部分时间是以轻负载驱动的。因此，轻负载时的损耗降低将大幅贡献于油耗的减少。DC/DC 转换器以轻负载运行时，流入到 MOSFET 的电流较小，因而输出容量 C_{oss} 在充放电时产生的损耗 E_{oss} 所占的比例较大。因此，S2A 系列优化了表面结构，降低了总栅极电荷量 QG，使 E_{oss} 比 S1A 系列降低了约 30%（**图 7**）。

S2A 系列通过改善 E_{toff} 和 V_{DS} 浪涌电压的均衡关系，降低 E_{oss}，降低了开关损耗。由此，能够以比过去更高的频率驱动电力转换电路，使变压器小型化，从而实现电力转换装置的小型化。

3.4　车载品质

车载产品要求对温度变化有高耐量。S1A 系列和 S2A 系列优化了芯片厚度和组装时芯片下的焊接条件，提升了塑模树脂和引脚框架的粘合性等，相比相同封装、相同芯片尺寸的民生品，大幅改善了热循环耐量（**图 8**）。

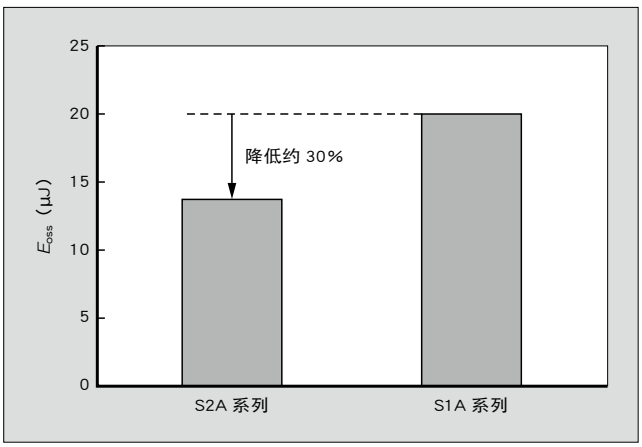

图 7　充放电时产生的损耗 E_{oss}

4　产品系列和特性

表 1 展示了 S2A 系列的产品系列和主要特性。结合之前介绍的导通电阻特性和开关特性的改善，所有产品系列还都满足了 AEC Q101 标准，这是确保车载用分立器件产品可靠性的标准。

使用 TO-247 封装的 S1A 系列在 600 V 耐压时，导通电阻最小值为 40 mΩ，但 S2A 系列可达到 25.4 mΩ。另外，使用小型 SMD（Surface Mount Device）的 T-Pack（D2-Pack）时，S1A 系列 600 V 耐压的导通电阻为 145 mΩ，而 S2A 系列可达到 79 mΩ，从封装尺寸的角度来看，可为电力转换设备的小型化做贡献。

TO-247 封装、导通电阻 25.4～160 mΩ 和 T-Pack 封装、导通电阻 81～160 mΩ 的产品将系列化。此外，我们还推出了相比 S2A 系列，内置二极管进一步高速化的 FRED（Fast Recovery Diode）型“Super J MOS S2FDA 系列”产品。

表 1　“Super J MOS S2 A 系列”的产品系列和主要特性

V_{DS}	$R_{DS\ (on)}$ max.	I_D	FRED	TO-247	T-Pack（D2-Pack）
400 V	60 mΩ	42 A	○	—	FMC40N060S2FDA
500 V	71 mΩ	39 A	○	FMY50N071S2FDA	FMC50N071S2FDA
600 V	25.4 mΩ	95 A		FMY60N025S2A	—
	40 mΩ	66 A		FMY60N040S2A	—
	70 mΩ	39 A		FMY60N070S2A	—
	79 mΩ	37 A		FMY60N079S2A	FMC60N079S2A
	81 mΩ	36 A	○	FMY60N081S2FDA	FMC60N081S2FDA
	88 mΩ	33 A		FMY60N088S2A	FMC60N088S2A
	99 mΩ	29 A		FMY60N099S2A	FMC60N099S2A
	105 mΩ	28 A	○	FMY60N105S2FDA	FMC60N105S2FDA
	125 mΩ	23 A		FMY60N125S2A	FMC60N125S2A
	133 mΩ	22 A	○	FMY60N133S2FDA	FMC60N133S2FDA
	160 mΩ	18 A		FMY60N160S2A	FMC60N160S2A

5 后记

车载用第 2 代 SJ-MOSFET“Super J MOS S2 系列”是低损耗并能抑制 V_{DS} 浪涌电压的产品，可为电力转换设备的高效化和小型化做出重大贡献。

今后，为应对进一步高度化的市场需求，富士电机将通过扩大耐压系列、进一步微细化超结结构等，推进芯片的小型化和导通电阻的降低等，开发出高性能、高品质的车载用分立器件产品。

参考文献

⑴ 田村隆博ほか. 低損失 SJ-MOSFET「Super-JMOS」. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.340-343.

⑵ Tamura, T. et al. “Reduction of Turn-off Loss in 600 V-class Superjunction MOSFET by Surface Design”, PCIM Asia 2011, p.102-107.

⑶ Watanabe, S. et al. “A Low Switching Loss Superjunction MOSFET (Super J-MOS) by Optimizing Surface Design”, PCIM Asia 2012, p.160-165.

⑷ Fujihira, T. “Theory of Semiconductor Superjunction Devices”, Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.

⑸ Deboy, G. et al. “A New Generation of High Voltage MOSFETs Breaks the Limit Line of Silicon”, Proc. IEDM, 1998, p.683-685.

⑹ Onishi, Y. et al. 24m・cm^2 680V Silicon Super junction MOSFET”, Proc. ISPSD’02, 2002, p.241-244.

⑺ Saito, W. et al. “A 15.5m・cm^2-680V Superjunction MOSFET Reduced On-Resistance by Lateral Pitch Narrowing”, Proc. ISPSD’06, 2006, p.293-296.

⑻ 大西泰彦ほか. Superjunction MOSFET. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.389-392.

⑼ 渡边荘太等. 第 2 代低损耗 SJ-MOSFET “Super J MOS S2 系列”. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.1, p.51-54.

⑽ Sakata, T. et al. “A Low-Switching Noise and High-Efficiency Superjunction MOSFET, Super J MOS® S2”, PCIM Asia 2015, p.419-426.

田平 景辅

从事分立器件功率 MOSFET 的开发和设计。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分立器件・IC 技术部。

新村 康

从事功率半导体元件的开发和设计。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。

皆泽 宏

从事分析评估技术的开发、磁性记录媒体的开发和 SJMOSFET 芯片工艺的开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部工艺开发部主查。日本物理学会会员。

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。