



NE Handbook Power Device

NE 手册系列

功率半导体



GaN
元器件

IGBT

功率二极管

实现节约能源、创造能源、
储蓄能源。

罗姆的 功率元器件

工业用功率元器件
产品阵容扩充！

耐高压
MOSFET

功率模块

功率IC

SiC元器件

罗姆半导体集团
www.rohm.com.cn

ROHM
SEMICONDUCTOR

6	第一章 功率半导体基础知识
6	功率半导体
9	功率MOSFET
10	SJ功率MOSFET
11	IGBT
12	Si的性能极限
13	新一代功率半导体
17	SiC基板
19	GaN基板
21	SiC与GaN
22	第二章 新一代功率半导体的开发动向
22	SiC制SBD
26	SiC制MOSFET
30	SiC制BJT
32	SiC模块
34	GaN功率元件
38	氧化镓
42	第三章 新一代功率半导体的应用事例
42	汽车
46	车载音响
48	铁路
52	光伏发电系统
54	家电产品

稳步扩大功率半导体业务领域

增加SiC产品开拓高耐压器件市场

罗姆自1958年创业以来，不断稳步扩大业务范围。该公司目前正在积极拓展的业务领域是功率半导体。除了长期以来一直从事的Si(硅)半导体器件外，还在业内率先推出了采用SiC(碳化硅)半导体技术的产品。由此实现从低耐压器件到耐压超过1000V的高耐压器件的广泛产品系列。

“功率半导体”与传感器和LED一样同为罗姆的重点业务之一。该公司从数年前就开始加速开发功率半导体产品，目前提供MOSFET、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、FRD(Fast Recovery Diode)、SBD(Schottky Barrier Diode)等分立元件以及栅极驱动IC等大量功率半导体器件。另外，为了满足更广泛用途的需求，正在扩大产品群所对应的额定电压和额定电流范围(图1)。除了在Si半导体产品中提供最大额定电压达到约1500V的产品外，还在

600V以上的高耐压器件领域，领先业内迅速投产采用新一代SiC材料的器件。目前正在增加产品型号。

根据用途推出各有所长的产品



东田 祥史氏
罗姆分立器件生产本部
功率器件开发部
统括课长

“在采用Si半导体的分立器件方面我们明确区分用途，根据不同需求提供拥有不同特点的产品”(罗姆分立器件生产本部功率器件开发部统括课长东田祥史)。比如，额定电压最大为100V左右的低耐压品以“智能手机”、“个人电脑”以及“工业设备和汽车”三个领域为主要应用对象。“在额定电压为十几伏的智能手机用途方面，重视器件的小型化”(东田)。例如在低导通电阻的MOSFET“ECOMOS™”系列中推出了安装面积仅0.8mm×0.6mm的小型产品。“在3端子产品中为业界最小级别”(东田)。

在额定电压为数十伏、额定电流最大为20A左右的个人电脑用途，在反复改进工艺的同时，提供多种封装的产品。“个人电脑用途的需求多种多样，因此打算在重视开发效率的同时积极扩大产品种类”(东田)。例如，2012年上市的新MOSFET中，就推出了安装面积仅2.0mm×2.0mm的小型“HUML2020”等5种封装的器件。

在电动工具等工业设备及汽车用途产品中，扩充额定电压为40V～100V的产品种类。“已从2012年4月开始样品供货用于24V输入DC-DC转换器的40V额

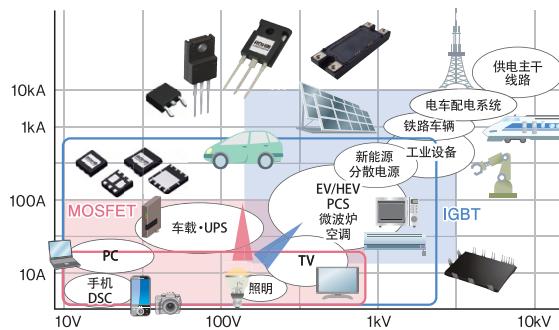


图1●扩大功率半导体的业务范围

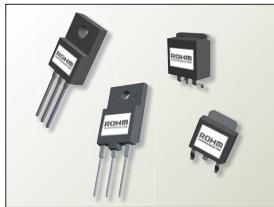


图2●实现了低导通电阻和高速开关特性的高耐压MOSFET“PrestoMOS™”



图3●2012年3月率先在业界量产的“全SiC模块”

定电压MOSFET。这是一款具备业界首屈一指的出色功率转换性能的器件”(东田)。该产品涵盖额定电流为9A～100A的大应用范围，并根据用途的不同准备了6种封装。继该产品之后，罗姆还预定投产额定电压为60V～100V的MOSFET。

在额定电压为数百伏以上、额定电流最大为100A的高耐压

品领域，罗姆推出了用于功率调节器和电源的产品。“以高耐压、低导通电阻的超级结构造MOSFET为核心提供产品”(东田)。其中尤其值得关注的产品是以低导通电阻实现了高速 t_{rr} (反向恢复时间)特性的“PrestoMOS™”元件(图2)。一般情况下，具备超级结构造的器件与平面型MOSFET相比，反向恢复时间(t_{rr})较长。而PrestoMOS™通过采用独特工艺，将反向恢复时间较原产品缩短了80%。

利用SiC开拓耐压1000V以上的市场

在以额定电压为600V以上的高耐压品为主的SiC半导体产品方面，罗姆领先业界快速扩展产品。与Si相比可实现小型低损耗功率半导体的SiC在很多领域受到了关注。罗姆2010年4月在日本的半导体厂商中

第一个开始量产SiC SBD。2010年12月又在全球率先开始量产SiC-MOSFET。2012年3月又开始量产仅利用SiC元件构成的业界首款“全SiC模块”(图3)。“罗姆的SiC功率半导体器件已经得到了服务器、空调、工业设备电源、光伏发电系统中的功率调节器以及电动汽车的快速充电器等多种系统的应用”(罗姆分立器件生产本部SiC功率器件制造部副部长 伊野和英)。

目前，罗姆的SiC功率半导体产品正逐渐向性能更高的第二代产品过渡。分立器件方面，推出了正向电压(VF)比第一代产品降低0.1V～0.15V的SBD。MOSFET方面，已与耐压为1200V的第二代“SCT系列”同时，还开始量产在业界率先实现了SiC SBD一体化的MOSFET“SCH系列”。“预定2012年秋开始样品供货额定电压为1200V、额定电流为180A的SiC-MOS模块，以及将额定电压提高至1700V的全SiC模块”(伊野)。

罗姆正在不断扩充产品种类，不断扩大功率半导体领域的业务范围。在对拥有出色性能的功率半导体的需求日益高涨的情况下，罗姆可以说是一家让人不得不关注的企业。



罗姆半导体集团
www.rohm.com.cn



伊野 和英氏
罗姆分立器件生产本部
SiC功率器件制造部
副部长

功率半导体

如今,功率 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor : 金属氧化物半导体电场效应晶体管) 和 IGBT (insulated gate bipolar transistor : 绝缘栅双极型晶体管) 等功率半导体器件获得了前所未有的关注 (表 1)。现在,全世界很多半导体企业都在斥巨资研发和生产功率半导体。在日本国内,东芝、富士通微电子、富士电机、松下、三菱电机、瑞萨电子、罗姆等半导体企业都在为夺取功率半导体的市场霸权而卯足了精神。

各公司大力发展功率半导体的缘由在于全世界对环保意识的提升。保护环境需要减少耗电量和减排二氧化碳 (CO_2)。但人们并不希望为此而降低生

活品质和便利性。虽然这两个要求截然相反,但使用功率半导体,二者就可以同时得到实现。

以空调为例。通过使用安装了功率半导体的逆变器进行精密控制,与只能单纯控制开关的机型相比,不仅制冷制暖更加舒适,而且耗电量还能减少约 30%。冰箱和洗衣机等电器同样如此。只要使用功率半导体,舒适性、便利性以及节电可以兼顾。

功率半导体活跃的舞台并非只有空调、冰箱等家电。混合动力车和纯电动汽车也是离开功率半导体就无法成立的产品。这些车辆均依靠储存在充电电池中的电能来驱动马达行驶。此时,如果直接利

表1：主要功率半导体的比较

本表比较了功率MOSFET、SJ构造的功率MOSFET、IGBT的性能。
并参考列出了正在开发之中的新一代功率器件SiC(碳化硅)功率MOSFET。

	功率MOSFET	SJ功率MOSFET	IGBT	SiC功率MOSFET (参考)
器件类型	单极元件	单极元件	双极元件	单极元件
耐压范围	十几V~500V左右	500V~1kV	400V~十几kV	600V~几kV
导通电阻低	○	◎	○*1	◎
高速开关特性	○	○	△	◎
成本	○	△	○	×
代表性半导体企业	东芝、富士电机、 三菱电机、瑞萨电子、 美国飞兆半导体、 德国英飞凌科技、 美国国际整流器、 美国威世通用半导体 等	东芝、 瑞萨电子、 罗姆、 德国英飞凌科技、 意法半导体 等	东芝、富士电机、 三菱电机、瑞萨电子、 德国英飞凌科技、 德国赛米控、 意法半导体、 美国威世通用半导体 等	东芝、 三菱电机、 罗姆、 美国科锐、 德国英飞凌科技 等

*1 由于IGBT是双极元件,所以评价依据的是 $V_{CE}(\text{sat})$ (饱和电压、导通电压),而非导通电阻。此次为了便于比较,所以仍然在导通电阻栏内填写了评价。

Power MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

功率MOSFET

功率MOSFET是采用了能够支持大功率的电路构造的MOSFET。一般多采用DMOS(double diffused MOSFET)构造。大多用于10多V～500V左右耐压用途。

功率MOSFET的特点是能够获得低导通电阻和高速开关特性。不仅构造简单，而且产量极高，因此元件成本很低。称得上是最理想的功率半导体。在10多V～500V左右的耐压范围内可谓所向披靡。

但功率MOSFET也存在弱点——这就是提高耐压比较困难。如果为了提高耐压而增加元件的厚度，就会导致导通电阻的增大。30V耐压产品的导通电阻仅为数mΩ，而500V耐压产品就达到了数Ω。因此，900V耐压产品虽有投产，但在超过500V耐压时，功率MOSFET的竞争力急剧下降。

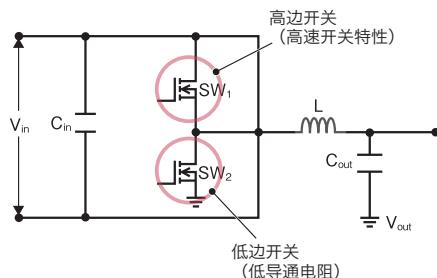
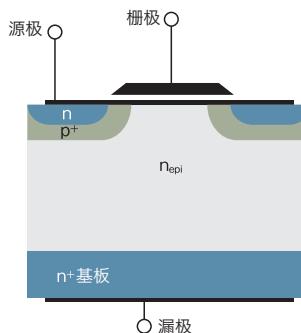


图1：DC-DC转换器中的功率半导体

DC-DC转换器电路(图为降压型)使用了高边开关和低边开关两个功率半导体。



功率MOSFET的一般构造

常见的功率MOSFET的元件构造。特点在于能够获得低导通电阻和高速开关特性。

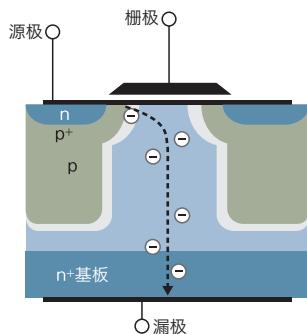
Super Junction Power MOSFET

SJ功率MOSFET

在超过 500V 的耐压区域导通电阻增大——为了解决功率 MOSFET 的这个弱点, SJ 功率 MOSFET 应运而生。这是一种在 1998 年投入实用的新型功率半导体。之后, 很多企业都推出了相同构造的产品, 如今已经发展成了一个成熟的产品领域。

SJ 功率 MOSFET 在构造上的特点在于深 p 型外延层。有了这个外延层, 就能够沿元件的垂直方向确保让电流容易流经的通道。这也就可以降低导通电阻。SJ 功率 MOSFET 的耐压区域约为 500V ~ 1kV。

拥有以上特点的 SJ 功率 MOSFET 同样存在弱点。那就是价格。这是因为需要在元件的内部制作深 p 型外延层, 制造工艺变得复杂所致。

**超结构造**

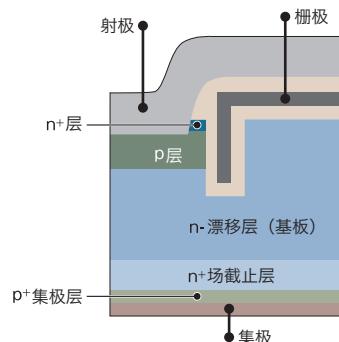
SJ功率MOSFET的元件构造。与功率MOSFET相比, p层更深。

Insulated Gate Bipolar Transistor

IGBT

在 400V ~ 10 数 kV 的高耐压区域, 现在最常用的功率半导体是 IGBT。IGBT 是输入部分采用 MOS 构造, 输出部分采用双极构造的器件。通过采用这种构造, 使用电子与空穴两种载流子的双极元件能够兼顾低饱和电压 (相当于功率 MOSFET 的导通电阻) 和较快的开关特性。

现在, IGBT 的饱和电压已经降到了 1.5V 左右, 开关特性已经可以支持到 50kHz 左右。而且, 因为是双极元件, 所以构造简单, 与耐压相同的功率 MOSFET 相比, 还具有价格要低许多的优势。不过, 开关特性虽然得到了改善, 但工作频率依然不及功率 MOSFET。这是 IGBT 的弱点。使用功率 MOSFET 时, 工作频率可以超过 100kHz。

**IGBT的元件构造**

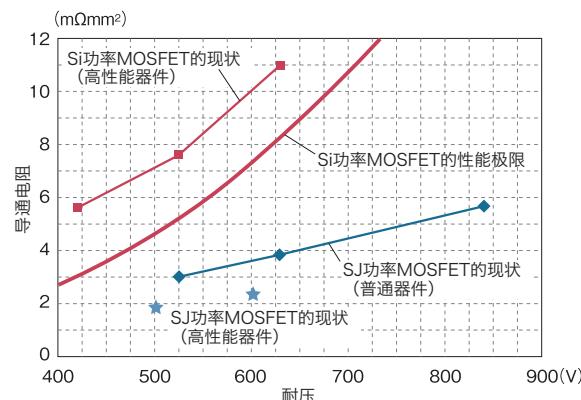
输入部分为MOS构造, 输出部分为双极构造。(出处:英飞凌科技)

Performance Limitations of Silicon Devices

Si的性能极限

现在，使用 SiC（碳化硅）和 GaN（氮化镓）的新一代功率器件的开发正在推进之中，部分器件也已经投产。这些新一代功率器件的开发之所以进展快速，是因为使用 Si 材料的功率半导体已经接近了性能的极限。

对于一般的功率 MOSFET (RDS (ON)) 的导通电阻而言，存在着由 Si 材料性质决定的性能极限。通过采用 SJ 构造，这一性能极限被超越。但时至今日，即便是 SJ 功率 MOSFET，降低导通电阻的余地也已经所剩无几。在这种情况下，为了从使用 Si 的功率半导体手中接过接力棒，新一代功率器件的开发正在如火如荼地进行。

**Si功率半导体逼近性能极限**

通过采用 SJ 构造，虽然超越了常见的功率 MOSFET 的性能极限，但降低导通电阻的余地却越来越小。(出处：英飞凌科技)

Next Generation Power Device

新一代功率半导体

为了降低空调、冰箱、纯电动汽车、混合动力车配备的逆变器等电源电路上产生的电力损耗，备受人们期待的是使用 SiC 和 GaN 等材料的新一代功率半导体器件。

能够发挥出 SiC 和 GaN 的强大材料特性的功率半导体器件已经投产。SiC 方面，德国英飞凌科技于 2001 年 8 月投产了肖特基势垒二极管 (SBD)。在 2010 年底到 2011 年初，罗姆、美国科锐先后宣布将开始量产功率 MOSFET。至此，逆变器中必不可少的功率 MOSFET (JFET) 器件悉数到齐，“全 SiC”化有了实现的希望。再来看 GaN，美国国际整流器公司 (International Rectifier) 于 2010 年 2 月、美国宜普电源转换公司 (Efficient Power Conversion) 于同年 3 月也先后宣布了投产 GaN 功率晶体管的决定。

电力损失减至一半以下

新一代功率半导体蕴含着极高的实力。例如，为逆变器采用新一代功率半导体后，与使用现行的 Si 制功率半导体相比，虽然电力损失的具体数值会因输出功率和电路构成而略有差异，但基本上能够降低到一半以下。而且还能够削减逆变器的外形尺寸和重量。因为有助于实现电器和车辆的小型化和轻量化，所以能够提高能源的利用效率。

与 Si 制功率半导体相比，新一代功率半导体优点诸多。那么，新一代功率半导体的为什么能够实现高性能呢？其答案在于 SiC 与 GaN 的材料特性上。值得关注的基本特性大致有三点（见表 1）。（1）绝缘击穿电场、（2）饱和漂移速度、（3）导热率。

导通电阻降至 1/1000

SiC 与 GaN 的绝缘击穿电场比 Si 大了一个数量级。因此，在耐压相同的情况下，使用 SiC 和 GaN 的功率半导体器件的厚度只是 Si 器件的约 1/10。器件越薄，电流在器件内部通过的距离（漂移层）越短。因此，导通电阻也可以减少至约 1/10。

而且，SiC 和 GaN 与 Si 相比，能够提高作为载

表1：SiC和GaN的基本材料特性

SiC 和 GaN 在绝缘击穿电场、饱和漂移速度、导热率等性能方面远胜过 Si。充分利用这一特点，功率半导体器件就可以达到更高的性能。另外，表中 SiC 栏所标注的数值为晶体构造 4H-SiC 的性能。（出处：日本产业技术综合研究所）

	Si（硅）	SiC（碳化硅）		GaN（氮化镓）
带隙	1.12eV	3.26eV		3.4eV
相对介电常数	11.9	9.7		9.5
绝缘击穿电场	3.0×10^5 V/cm	2.7×10^6 V/cm		3.5×10^6 V/cm
饱和漂移速度	1.0×10^7 cm/s	2.2×10^7 cm/s		2.7×10^7 cm/s
电子迁移率	1350cm ² /Vs	1000cm ² /Vs		900cm ² /Vs
导热率	1.5W/cmK	4.9W/cmK		2W/cmK

流子的杂质浓度，具有可降低导通电阻的特点。因为杂质的浓度按照与绝缘击穿电场强度的平方成正比的关系增加，所以使用绝缘击穿电场 10 倍于 Si 的 SiC 和 GaN 时，杂质浓度可以提高 100 倍。如此一来，载流子的数量也就随之提高 100 倍，导通电阻可以降低到大约 1/100。

通过绝缘击穿电场降低的导通电阻，以及通过杂质浓度降低的导通电阻。两种方式获得的效果为乘积效应，所以 SiC 和 GaN 在理论上能够使导通电阻降低到 Si 的 1/1000（图 1）。

关于第二个基本特性——饱和漂移速度，SiC 和 GaN 比 Si 快 2 ~ 3 倍左右。饱和漂移速度的加快可以使开关更加迅速。换言之，也就是能够提高开关频率。

提高开关频率的效果体现在电感器、电容器等周边部件的小型化上。一般来说，交流电路的电感值和电容值是频率的函数。因此，当电感值或电容值相同时，频率越高，就可以使用容量越小的电感器和电容器。

SiC Wafer**SiC 基板**

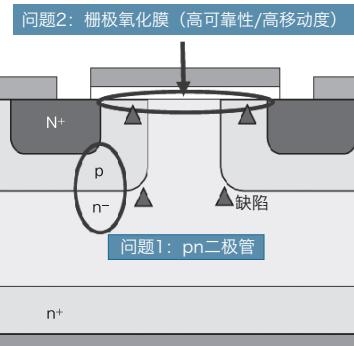
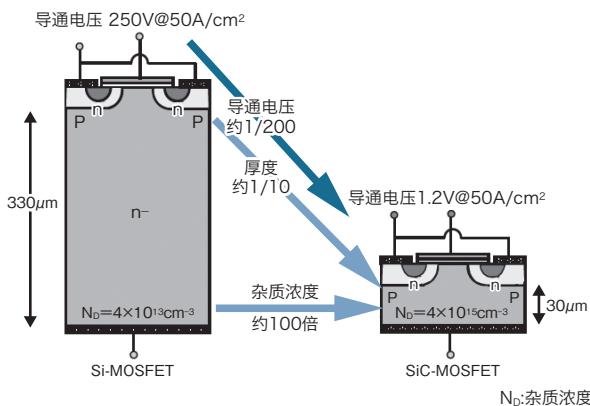
电感器与电容器的体积与其容量数值基本成正比。也就是说，如果电感值和电容值只需 1/10，那么体积也就可以缩小到 1/10。在逆变器等器件中，电感器和电容器所占的比例相当大。正因为如此，高频化能够获得的效果非常明显。

关于第三个基本特性——导热率，SiC 是 Si 的约 3 倍，GaN 是约 1.4 倍。提高导热率后，在器件内产生的热量就更容易释放到外部。这样，散热片等冷却部件就可以采用更小型的产品。

使用 SiC 和 GaN 的新一代功率半导体虽说已经朝着普及目标顺利迈出了步伐。但是，要想全面替换 Si 功率半导体，还有几个课题必须解决。日本产业技术综合研究所的奥村元指出，“SiC 和 GaN 最大的课题都是基板”。

首先来看 SiC 功率半导体的基板。一般来说，SiC 功率半导体使用 SiC 单晶基板。这种基板现在存在两个问题。一个是基板品质不佳，另一个是基板直径太小。

基板品质的问题在于位错密度。位错是指基板内存在的缺陷。位错密度高不仅会增大电流通过的

**SiC功率MOSFET存在的问题**

问题大致分为两个。一个是器件内部形成的pn二极管。另一个是栅极氧化膜的品质问题，因为对器件本身的可靠性影响较大，所以目前正在加紧改进之中。最有效的解决方法是开发位错密度小的SiC单晶基板。
(出处：日本产业技术综合研究所)

GaN Wafer**GaN 基板**

难度，还会降低可靠性。

奥村表示，“现在，SiC 单晶基板的位错密度约为 10^4 个 / cm^2 。这个数值对于制造 SBD 不会造成太大的问题。但用于制造功率 MOSFET 就变成问题了。位错密度需要降低到约 200 个 / cm^2 ”。

功率 MOSFET 要求位错密度低的原因在于栅极氧化膜。栅极氧化膜上加载着大电场，应力持续存在。因此，如果位错密度大，器件本身就会发生劣化。

基板直径直接关系到成本

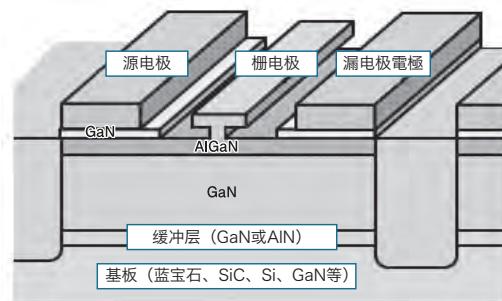
另一个课题——基板直径直接关系到了成本的大小。直径越大，1 枚基板能够制造的器件越多。也就能降低单位器件的成本。

现在，直径为 4 英寸的 SiC 单晶基板已经比较容易买到。但奥村表示，“4 英寸还太小。如果 6 英寸不能成为主流，成本恐怕还会很高”。

不过，直径增大后，位错密度也会随之增加。如果位错密度增加，就生产不出可靠的功率半导体。所以，SiC 单晶基板的开发需要同时实现基板的大直径化与降低位错密度。

GaN 功率半导体的产品化始自 2010 年冬季。制造工艺采用在 Si 基板上叠加 GaN 薄膜的“异质外延生长法”。但这种工艺必须对晶格不同的材料进行叠加，很难制造出高品质的晶体。“制造 LED 的话还不是大问题，但功率半导体加载的电场和流经的电流都大于 LED。因此，可靠性方面的担忧无法消除”（日本产业技术综合研究所先进功率电子研究中心主任奥村元）。实际上采用“异质外延生长法”制造的产品耐压仅为几十~200V，漏极电流最大也仅为 30A 左右。GaN 材料的高耐压、高效率的特点并未得到充分的发挥。

既然如此，我们可以改换成叠加相同材料的“同质外延生长法”制造工艺。这种方法不使用 Si 和蓝宝石等不同的材料作为基板，而是使用 GaN 作为基

**GaN 功率半导体的构造**

GaN 功率半导体采用横向构造。也就是 HEMT (high electron mobility transistor) 构造。因为采用了这种构造，所以电子迁移率高。因为能够大幅提升开关频率，所以可以实现电源电路的小型化。（出处：日本产业技术综合研究所）

SiC and GaN

SiC 与 GaN

板。GaN 单晶基板现在已经实用化，但用作 GaN 功率半导体的基板仍然存在不足。

目前 GaN 单晶基板面临的课题有两个。一个是基板直径小。现在能够获得的最大尺寸仅为 2 ~ 4 英寸。而蓝宝石最大为 6 英寸，Si 最大为 8 英寸以上。直径越小，1 枚基板能够制作的器件越少。因此，成本也就越高。

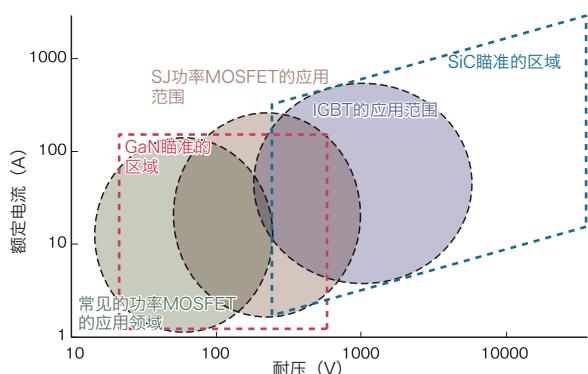
另一个课题是基板品质不稳定。基板内存在的缺陷之一——晶体位错的密度高达 10^5 个 / cm^2 左右。“这种状态下，很难批量生产高耐压、大电流的 GaN 功率半导体。位错密度需要降低到 $10^2 \sim 10^3$ 个 / cm^2 左右”（奥村）。

现在，旨在解决 GaN 单晶基板的上述课题的开发正在快速推进。比如，制定 6 英寸 GaN 单晶基板的生产计划，导入切削薄基板技术等。除此之外，还有利用制造人工水晶等大型晶体的技术来实现 GaN 单晶基板的大直径化和高品质化的动向。通过采用这些新技术，成本可以大幅减少。

无论是 SiC 还是 GaN，只要基板的问题得到了解决，为数众多的半导体企业就能够推出更丰富多彩的器件。

SiC 功率半导体的战略十分明确。Si 功率半导体中的 IGBT 瞄准的是大约 600V 以上的高耐压区域。IGBT 的导通电阻较低，但开关速度也较慢。SiC 功率 MOSFET 的导通电阻和开关速度都优于 IGBT。

那么，GaN 功率半导体瞄准的是哪个区域呢？业界的一般看法是，GaN 功率半导体瞄准的耐压区域比 SiC 功率半导体低，大约为几十 V ~ 600V。但是在这个耐压区域，除了普通的功率 MOSFET 之外，SJ 构造的功率 MOSFET 也大量投放，性能颇高的器件价格已经以相当低廉的价格在销售。GaN 功率半导体能否实现普及，关键在于其性价比能否超越 Si 功率半导体。



SiC 瞄准耐压 600V 以上的用途

SiC 功率半导体瞄准的市场是大约 600V 以上的耐压用途。GaN 功率半导体瞄准的则是大约 600V 以下的耐压用途。

SiC Schottky Barrier Diode

SiC 制 SBD

SiC 肖特基势垒二极管 (SBD) 于 2001 年由德国英飞凌科技率先投产，之后，意法半导体和美国科锐等欧美企业也相继量产。

日本企业中最先行动的是罗姆，该公司 2010 年 4 月开始量产供货耐压为 600V、输出电流为 10A 的 SiC 制 SBD “SCS110A 系列”。量产化之际，解决了肖特基接触势垒的均匀性以及无需高温处理的高电阻保护环 (Guard Ring) 层的形成等一系列问题。另外，2010 年 10 月，三菱电机在空调压缩机用逆变器中配备了自主开发的 SiC 制 SBD。这是 SiC 功率半导体“全球首次”（三菱电机）用于面向普通消费者的产品。

除此之外，2010 年开始从事 SiC 制 SBD 业务的厂商接连涌现。比如，新日本无线、新电元工业和瑞萨电子分别于 2010 年春、2010 年 7 月和 2011 年 3 月开始样品供货 SiC 制 SBD。其中，新电元工业早在 2006 年 9 月就已经开始量产 SiC 制 SBD，不过到 2010 年春之前一直是从外部采购芯片而非自行制造的模式，此次则建立了从芯片制造到封装全部独立完成的体制。

涉足 SiC 制 SBD 业务的厂商不断增加的原因在于，制作功率元件不可或缺的 SiC 基板品质有了好转。例如，结晶缺陷减少、品质得到提高，而且还

推进了基板的大直径化（图 1）。直径为 4 英寸的产品逐渐成为主流。预计 2012 年内会开始样品供货 6 英寸产品，2013 年 6 英寸产品也将进入量产阶段。

另外，随着基板厂商的增加还带来了价格竞争，基板比以前更便宜了。层积外延层的外延基板厂商的增加也降低了涉足 SiC 制 SBD 业务的门槛。

除了 SiC 基板的业务环境好转之外，大功率用途的 Si 二极管“比 Si 晶体管的性能提高余地更小”（熟悉功率元件的技术人员），这一缺点也推动了对 SiC 二极管的需求增加。Si 二极管构造简单，但相对而言，“性能提高逐渐接近极限，替换为 SiC 二极管的动向今后将增加”（同上）。

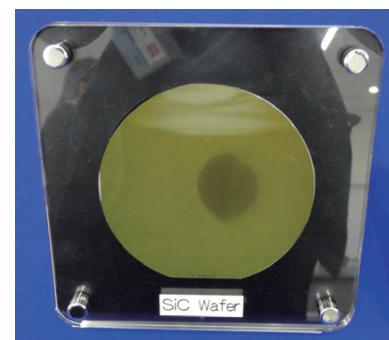


图 1：SiC 基板不断实现大直径化

SiC 基板的大直径化和低价格化推动了 SiC 制 SBD 的业务发展。照片为德国 SiCrystal 公司的 SiC 基板。

2012 年新一代产品亮相

2012 年，特性得到改善的新产品接连亮相。

其中，瑞萨电子 2012 年宣布推出将 2011 年发布的 SiC 制 SBD “RJS6005TDPP”，以及 Si 高耐压晶体管收纳到一个封装中的复合器件（图 2）。“寻找与此前从未用过的器件相匹配的器件并非易事。此次的复合器件大幅减轻了这种作业负担”（瑞萨电子）。复合器件通过组合使用 MCU 和多种控制 IC 等，可轻松构成电源电路和逆变器电路。该公司还计划提供空调等特定产品使用的电路评估板（开发套件）。

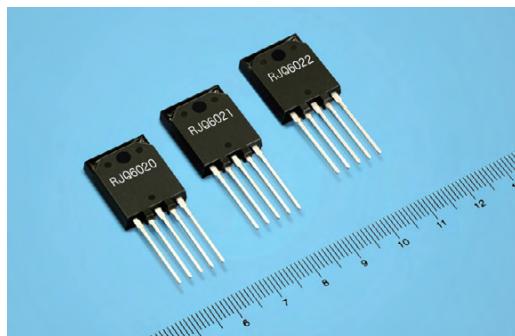


图2：SiC制SBD和Si晶体管收纳在一个封装中

瑞萨电子推出了将 SiC 制 SBD 和 Si 晶体管收纳在一个封装中的复合器件。
(照片：瑞萨电子)

提高了 SiC 制 SBD 特性的，是在日本国内厂商中率先开始量产的罗姆。该公司开发出了正向电压只有 1.35V 的 SiC 制 SBD “SCS210AG/AM”，已于 2012 年 6 月开始样品供货（图 3）。正向电压比该公司的原产品小 10%，为“业界最小”（罗姆）。

一般情况下，正向电压降低，反向的漏电流就会增加。罗姆虽然没有公布详情，但表示通过改善制造工艺和元件构造，在保持低漏电流的情况下成功地降低了正向电压。其中正向上升电压尤其低，此举有望改善常用的低负荷状态下的工作效率。

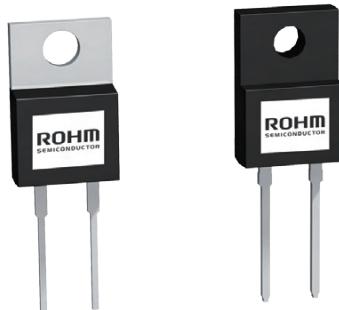


图3：正向电压减小10%

罗姆开发出了与该公司原产品相比正向电压减小 10% 的 SiC 制 SBD。
(照片：罗姆)

SiC Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Diode

SiC 制 MOSFET

SiC 晶体管虽然已经开始产品化，但还不如 SiC 二极管那样普及，只在很少的用途得到了采用。这是因为，晶体管比二极管的制造工艺复杂，所以成品率低、价格高。另外，Si 晶体管性能提高的速度虽然与以往相比要慢，但还是在不断提高之中。而且与二极管相比，“Si 晶体管性能提高的空间还很大”（熟悉功率元件的技术人员）。也就是说，就目前而言，低价格高性能的 Si 晶体管更便于使用。

在此背景下，削减 SiC 晶体管的成本并挖掘 SiC 出色的材料特性，实现 Si 所无法实现的性能的研发在不断加速。因原理上易于实现常开工作，所以许多企业在各种晶体管的开发中首选 MOSFET。

罗姆从 2010 年 12 月开始供货 SiC 制 MOSFET



图1：SiC制MOSFET的量产品
科锐2011年1月宣布推出SiC制MOSFET。(摄影：科锐)

的客户定制品。此外，美国科锐 2011 年 1 月宣布上市通用产品（图 1）。罗姆自主研发出了电场弛豫构造和筛选法，确保了可靠性，同时还开发了在 SiC 特有的 1700℃ 高温工艺下抑制特性劣化的技术，“全球首次”（罗姆）确立了量产体制。另外，科锐也强调自己“在业界首家推出产品”。

降低导通电阻

SiC 制 MOSFET 因导通时的损失较大，因此降低导通电阻以抑制导通损失的研发也在推进之中。目标是使导通电阻降到 Si 功率元件的 1/10 以下。

降低导通电阻的方法为采用在栅极正下方挖沟槽的“沟道型”。现已投产的 SiC 制 MOSFET 为“平面型”。平面型如果为降低通道电阻而使单元微细化的话，会导致 JFET 电阻（结型场效应晶体管电阻）增加，所以导通电阻的降低存在极限。而如果是沟道型，在构造上 JFET 电阻不存在。因此，更适合用来降低通道电阻，以减小导通电阻。

例如，罗姆试制出的沟道型 SiC 制 MOSFET，导通电阻与 Si 制 MOSFET 相比只有后者的 1/20 以下、与已经量产的 SiC 制 MOSFET 相比也不到 1/7（图 2）。除导通电阻外还减小了基板电阻，由此在 600V 耐压下实现了 $0.79 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 的导通电阻，在 1200V 耐压下

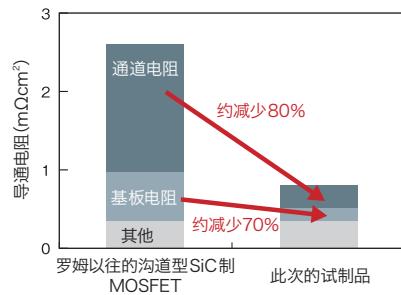
实现了 $1.41\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 的导通电阻。沟道型虽然可降低导通电阻，但由于在栅极正下方挖了沟槽，因此比平面型难以量产。目前尚未实现产品化。预计最早将由罗姆等于2013年推出产品。

除此之外，豪雅利用具备3C型结晶构造的SiC试制了MOSFET。现已投产的SiC功率元件采用4H型结晶。3C型SiC可在Si基板上生长结晶，因此适合用来降低材料成本和扩大基板直径。这样便有望实现低成本化。由于采用成长速度快的气相法来生长结晶，所以还有助于提高生产效率。

利用3C型SiC制作MOSFET还有望实现高通道迁移率。原因是栅极氧化膜的界面品质得到提高，捕获通道电子的界面态减少了。豪雅试制出了通道迁移率在室温下最大为 $370\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、是4H型的3倍以上的MOSFET。即使试制品的接合温度提高到 300°C ，也能维持 $178\text{cm}^2/\text{Vs}$ 。

豪雅虽然推进了采用3C型SiC的MOSFET研发，但该公司并不打算销售元件。只计划销售3C型SiC基板。研发MOSFET是为了证明3C型SiC的有用性，以便扩大SiC基板的销量。

(a)导通电阻的比较



(b)采用“双沟道构造”的SiC制MOSFET原理图

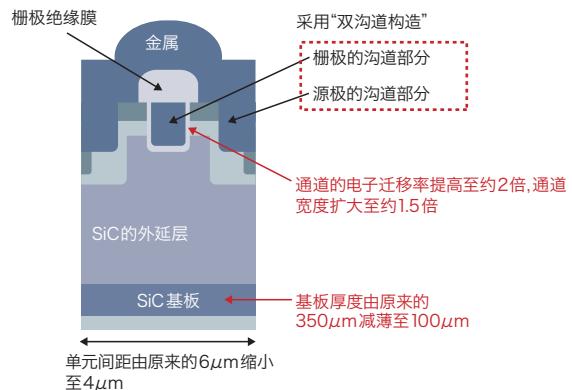


图2：采用双沟道构造

罗姆试制了导通电阻较小的沟道型SiC制MOSFET。采用在栅极和源极形成沟道的“双沟道构造”，减缓了电场向栅极的集中现象。(本图根据罗姆的资料制作)

SiC Bipolar Junction Transistor

SiC 制 BJT

SiC 双极结型晶体管 (BJT) 方面，已经公开发布了若干提高电流放大率的研发成果。电流放大率越高，越能以小电流开关 BJT，有望缩小 BJT 控制电路的尺寸。BJT 虽然具有导通电阻小等优点，但由于是电流控制型，存在 BJT 控制电路容易增大的课题。

其中，计划面向车载用途实现大电流化的本田技术研究所与新电元工业共同公开了 50A 产品和 100A 产品的开发情况。50A 产品的芯片尺寸为 0.54cm^2 ，有源区域为 0.25cm^2 。室温下的电流放大率为 145， 250°C 时为 50。耐压为 1100V，导通电阻为 $1.7\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （室温）。100A 产品的芯片尺寸为 $0.79 \times 0.73\text{cm}^2$ ，有源区域为 0.5cm^2 。室温下的电流放大率为 135， 250°C 时为 72。耐压为 1200V，导通电阻

在室温下为 $3.5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ， 250°C 时为 $6.6\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 。

京都大学的研发小组试制出了电流放大率（室温时）大幅超过本田技术研究所、为 257 和 335 的 SiC 制 BJT（图 1）。通过使室温下的电流放大率超过 200，在 200°C 等高温时也有望实现“100 以上”（京都大学）的放大率。该技术考虑用于光伏发电系统的功率调节器、电动汽车用动力控制单元及工业设备的逆变器装置等。

京都大学主要通过三种方法将电流放大率提高到了 257（图 2）。另外，通过改变形成 BJT 使用的 SiC 的结晶面，将电流放大率提高到了 335。今后的开发重点是提高耐压、降低成本、确保可靠性等。

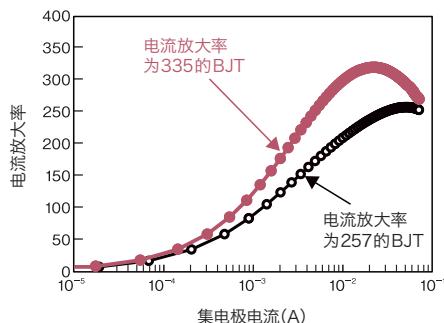


图 1：电流放大率超过 200

京都大学试制的 BJT 的电流放大率（本图根据京都大学的资料制作）

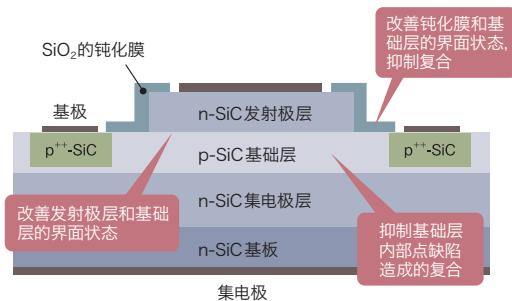


图 2：通过三种方法提高电流放大率

电流放大率的提高主要通过以下三种方法实现：改善钝化膜和基础层的界面状态、减少发射极层和基础层界面的杂质等、抑制基础层内部点缺陷造成的复合。（本图根据京都大学的资料制作）

SiC Module

SiC 模块

要想最大限度发挥新一代功率半导体的实力，封装技术也至关重要。除封装材料和接合材料的耐热温度外，还存在散热能力等技术方面的课题。进入 2012 年后，解决了上述课题的 SiC 模块开始产品化。

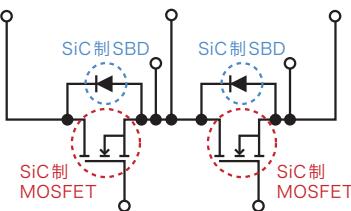
罗姆 2012 年 3 月开始量产采用 SiC 晶体管和二极管的“全 SiC”功率模块。虽然之前也有二极管采用 SiC 的产品，但连晶体管也使用 SiC 的模块此次还是“全球首次”（罗姆）投产。

全 SiC 模块与采用 Si 制 IGBT 的功率模块相比，可将开关损失降低 85%。另外，可实现 100kHz 以上的高速开关。开关频率可高达 Si 制 IGBT 模块的 10 倍以上。

(a) 全 SiC 功率模块



(b) 功率模块的电路图



全 SiC 量产模块最初只有额定电压为 1200V、额定电流为 100A 的一款产品。据罗姆介绍，虽然额定电流为 100A，但通过高速开关和低损耗化，可以替换额定电流为 200 ~ 400A 的 Si 制 IGBT 模块。替换 400A 级的 Si 制 IGBT 模块时，估计可将体积削减约 50%。

三菱电机也从 2012 年 7 月开始陆续供货 SiC 模块的样品。该公司此前一直在该公司的空调和铁路车辆用功率模块中采用 SiC 功率元件。此次“首次”（三菱电机）对外销售 SiC 功率模块。新产品共有 5 款，3 款用于耐压为 600V 的家电产品，剩余 2 款用于耐压为 1200V 的工业设备。其中各有一款为全 SiC 模块。

(c) 功率模块的概要

额定电压	1200V
额定电流	100A
开关频率	100kHz 以上
外形尺寸	122mm × 46mm × 17mm (不包含端子)
价格	IGBT 模块的 3 ~ 5 倍
量产数量	未公开 (京都量产基地的模块产能为月产数千个)

全 SiC 功率模块开始量产

罗姆配备 SiC 制 SBD 和 MOSFET 的全 SiC 功率模块的额定电压为 1200V，额定电流为 100A。（照片：(a) 罗姆）

GaN Power Devices

GaN 功率元件

GaN 功率元件的产品化此前存在三大课题。首先是（1）难以降低成本。以往可用于 GaN 功率元件的基板直径小，价格高。其次是（2）电气特性不足。GaN 虽然具备出色的材料特性，但用于功率元件后，在电气特性方面反而不如 Si 功率元件。第三是（3）可发挥 GaN 功率元件特点的周边技术的研发进展缓慢。例如，此前没有驱动 GaN 晶体管的专用栅极驱动 IC。因此，需要利用离散元件构成栅极驱动电路。

现在这种情况已经逐步改观（图 1）。（1）的成本方面，GaN 功率元件的成本不断降低，通过利用低价位大直径的 Si 基板，已有望实现与 Si 功率元件相当的价格。Si 基板可以使用 6 英寸以上的大直径产品。

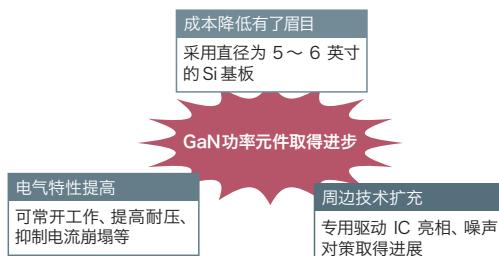


图1：GaN功率元件的课题逐渐解决

GaN 功率元件的三大课题正在逐步得到解决。成本降低已有了眉目；电气特性得到了提高；利用 GaN 功率元件所需的周边技术也在逐渐确立之中。

（2）的电气特性也得到了大幅提高。电气特性不如 Si 功率元件的问题已经基本有望解决。例如，抑制了工作时导通电阻上升的“电流崩塌”现象、提高了耐压等。POWDEC 公司通过在栅极和漏极间添加无掺杂 GaN 层和 p 型 GaN 层，抑制了电流崩塌现象的出现（图 2）。该公司已确认，在蓝宝石基板上确保了 1.1kV 的耐压，而且“基本没出现”（POWDEC）因电流崩塌造成的导通电阻上升。通过这些措施，2011 年下半年至 2012 年上市的 600V 耐压产品可将因电流崩塌而上升的导通电阻值抑制在 1.1 ~ 1.3 倍左右。

也有产品的耐压水平为 200V 以下，但在研发时超过 1kV 的产品。新一代功率元件技术研究协会发布了耐压高达 1.7kV 的 GaN 功率元件（图 3）。

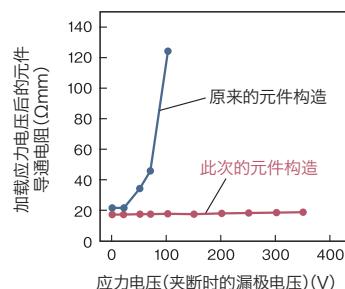


图2：抑制电流崩塌

POWDEC 通过在栅极和漏极间添加无掺杂 GaN 层和 p 型 GaN 层，在提高耐压的同时抑制了电流崩塌。该元件构造不容易发生电场集中，能减少漏电子，因此可抑制电流崩塌。（本图根据 POWDEC 的资料制作）

这是通过将外延层整体的厚度增至 $7.3\mu\text{m}$ 、将无掺杂 GaN 层的厚度减薄至 50nm 、以及设置碳掺杂 GaN 层等措施综合实现的。

松下开发出了可实现 2.2kV 耐压的元件技术。通过在 Si 基板表面附近设置 p 型层，减轻了向漏极加载正电压时，Si 基板和 GaN 界面产生的反转层漏电流（图 4）。由此，GaN 外延层能以 $1.9\mu\text{m}$ 的厚度实现 2.2kV 的耐压。利用该构造，还有望实现 3kV 以上的耐压。

(3) 中提到的能发挥 GaN 功率元件特点的周边技术也在逐渐改进。在常开工作的 GaN 功率元件中，有的元件能向栅极加载的电压范围很小。比如 EPC 公司的 100V 耐压产品的栅极电压范围为 $-5 \sim +6\text{V}$ ，小于相同耐压的 MOSFET 的 $-20 \sim +20\text{V}$ 范围。因此，基本无法向栅极加载大电压。为此，美国国家半导体开发的栅极驱动 IC 配备了不向栅极加载大电压的保护功能。

此外，还有公司在研究实现高迁移率的 HEMT（高电子迁移率晶体管）构造 GaN 半导体元件的可能性。罗姆从 2012 年开始开发以应用为前提的 HEMT 构造 GaN 半导体元件。通过提高开关速度、缩小平滑电路电容器和线圈的尺寸，可减小开关电

源的尺寸。另外，罗姆还计划利用其高速开关特性，开拓无线供电系统等新应用。

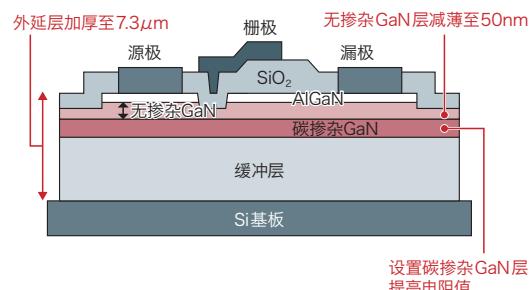


图 3：实现 1.7kV 耐压

新一代功率元件技术研究协会开发出了耐压高达 1.7kV 的常开型 GaN 功率元件。

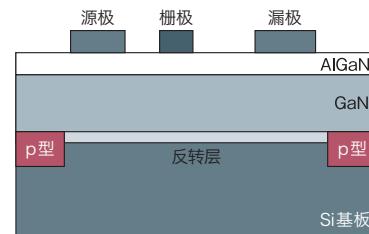


图 4：抑制漏电流，提高耐压

松下通过在 Si 基板表面附近设置 p 型层，提高了 GaN 功率元件的耐压。原因是，向漏极加载正电压时，可抑制 Si 基板和 GaN 界面产生的反转层漏电流。（本图根据松下的资料制作）

Gallium Oxide

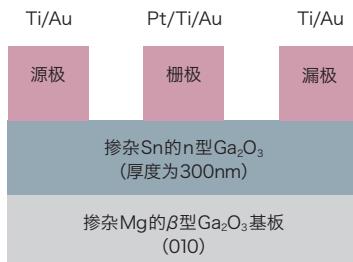
氧化镓

与作为新一代功率半导体材料被推进开发的 SiC 和 GaN 相比，有望以低成本制造高耐压低损耗的功率半导体元件而备受瞩目的是氧化镓材料中的一种—— β 型 Ga_2O_3 。

受关注的契机是日本信息通信研究机构(NICT)与田村制作所、光波公司共同试制的 β 型 Ga_2O_3 晶体管(图1)。该晶体管来自 NEDO 的“节能革新技术开发业务”中“超高耐压氧化镓功率器件研究开发”项目，基板制作由田村制作所和光波负责，外延层的形成由京都大学、东京工业大学和田村制作所负责，NICT 负责工艺。

试制的晶体管为栅极采用肖特基结性金属的“MESFET”(metal-semiconductor field effect transistor)。

(a)试制品的原理图



尽管是没有形成保护膜(钝化膜)的非常简单的构造，但耐压高达 257V，漏电流小到只有 $5 \mu\text{A}/\text{mm}$ 。

超过 SiC 和 GaN

之所以能比 SiC 和 GaN 实现耐压高、损耗低，是因为 Ga_2O_3 的性能比这两种材料都出色(图2)。其中，带隙和绝缘破坏电场尤其大。 Ga_2O_3 中，化学性较稳定的是 β 型，其带隙为 $4.8 \sim 4.9\text{eV}$ ，是 Si 的 4 倍以上，也高于 3.3eV 的 SiC 和 3.4eV 的 GaN。绝缘破坏电场为 $8\text{MV}/\text{cm}$ 左右，相当于 Si 的 20 倍以上、SiC 和 GaN 的 2 倍以上。

因此，就理论而言，制作相同耐压的单极性功率元件时， β 型 Ga_2O_3 比 SiC 和 GaN 更能降低导通电阻。通过降低导通电阻，可减小电源电路的电力损失。

(b)试制品的电气特性

耐压	257V
漏极截止时的漏电流	$3\mu\text{A}$ ($5\mu\text{A}/\text{mm}$)
漏电流的导通 / 截止比	10^4
互导的最大值	1.4mS ($2.3\text{mS}/\text{mm}$)

图1：用 β 型 Ga_2O_3 试制晶体管

NICT 等利用 β 型 Ga_2O_3 试制了晶体管(a)。虽然构造简单，但耐压高达 257V(b)。

Ga_2O_3 的耐压方面也有望超过 SiC。例如，利用形成了保护膜、设置有缓解电场向栅极集中的“场板”的单极性晶体管，“有望实现 $3k \sim 4\text{kV}$ 的耐压”(NICT)。

基板的制造方法可利用“FZ (floating zone) 法”和“EFG (edge-defined film-fed growth) 法”等溶液生长法，这也是 Ga_2O_3 的特点。溶液生长法适合以低成本量产结晶缺陷少、直径大的基板。

实际上，制造蓝色 LED 芯片所使用的蓝宝石基板就是利用 FZ 法和 EFG 法制造的。蓝宝石基板不仅便宜而且结晶缺陷少，大尺寸产品的直径达到了 $6 \sim 8$ 英寸。而 SiC 基板和 GaN 基板为利用气相法制造，所以难以降低结晶缺陷和实现大直径化。

(a) 参数比较

材料	β 型 Ga_2O_3	Si	SiC (4H型)	GaN	金刚石
带隙 (eV)	4.8 ~ 4.9	1.1	3.3		3.4
迁移率 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	300 (推测)	1400	1000		1200
绝缘破坏电场 (MV/cm)	8 (推测)	0.3	2.5		3.3
相对介电常数	10	11.8	9.7		9
Baliga 性能指数 ($\varepsilon\mu E_c^3$)	3444	1	340		870
					24664

图2：材料特性比 SiC 和 GaN 出色

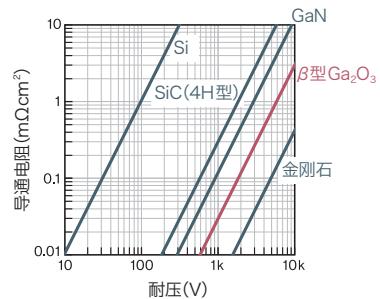
β 型 Ga_2O_3 的带隙和绝缘破坏电场尤其大，低损耗性指标“Baliga 性能指数”较高(a)。因此，制造相同耐压的功率元件时， β 型 Ga_2O_3 比 GaN 和 SiC 更易降低导通电阻(b)。(本图根据信息通信研究机构等的资料制作)

此次试制的晶体管使用的 Ga_2O_3 基板就是采用 FZ 法制作的，但外形尺寸尚小，只有 $6\text{mm} \times 4\text{mm}$ 。不过 NICT 认为，“将来直径为 6 英寸的 Ga_2O_3 基板有望以 1 万日元左右的成本制造。SiC 基板是无法做到如此便宜的”。

Ga_2O_3 蕴含着巨大的潜力，研究开发目前也才刚刚全面展开。试制的晶体管，在耐压、输出电流及电流的导通截止比等方面都还达不到要求，而且漏电流也比较大。另外还存在如何实现常开工作状态等课题。

据 NICT 介绍，当前的目标是在 2015 年之前利用 Ga_2O_3 制造直径为 4 英寸的基板和 MOSFET，计划 2020 年之前开始作为功率元件进行小规模量产。

(b) 耐压与导通电阻的关系



Automobile

汽车

SiC 功率半导体有望使混合动力车、纯电动汽车和燃料电池车等电动汽车的逆变器和 DC-DC 转换器等驱动系统大幅实现小型轻量化。因此，汽车厂商都对 SiC 功率半导体寄予了厚望。

丰田的技术人员在一场演讲会上公开表达了对 SiC 的期待，他所强调的 SiC 功率元件的优点之一是能够实现功率模块的小型化。以 IPM (Intelligent Power Module) 为例，估计利用 SiC 功率元件，体积可缩小至 Si 功率元件的 $2/3 \sim 1/3$ 。

另外，通过利用 SiC 功率元件提高开关频率，还可以削减电容和电抗的体积。比如，与利用 Si 功率元件时相比，开关频率提高 8 倍时，电容的体积仍可缩小至 $20 \sim 30\%$ ，电抗则可缩小至 25% 左右。

企业竞相开发

为满足汽车厂商的需求，多家企业正在竞相开发电动汽车用逆变器。例如电装就在汽车技术展会“人与车科技展 2012”(2012 年 5 月 23 ~ 25 日) 上展出了输出功率密度高达 60kW/L 的逆变器，并公开了性能参数(图 1)。这是电装与丰田和丰田中央研究所的共同研究成果。

电装试制的逆变器将功率半导体材料由原来的

Si 变为 SiC，同时采用自主开发的内部构造降低了元件内部的电阻，从而抑制了电力损失。另外，通过改进逆变器模块内的布线，减小了模块整体的电阻，发热量较原产品降低了 68%。

试制的逆变器体积为 0.5L ，输出密度为 60kW/L 是在输出功率为 30kW 时得到的数值。此时，功率元件的温度约为 180°C 。构成逆变器的器件除了配备 SiC 功率元件的模块外，还包括驱动 SiC 功率元件的控制电路、散热片、冷却扇以及电容器等。

三菱电机开发出了使逆变器和马达在同一轴上一体化的电动汽车用马达系统(图 2)，输出功率为 70kW 级。与该公司以往开发的逆变器和马达相互分离的系统相比，体积减小了一半。通过实现一体化，



图1：电装试制的逆变器
左为试制品，右为放入箱内后的產品示意图。

不但可以缩短逆变器与马达间的布线距离，还能整合以往逆变器和马达需要分别配置的水冷却管。重量减轻了约 10%。

一体化的“最大课题是如何抑制发热”（三菱电机）。马达和逆变器都是巨大的发热源，为此，三菱电机不但提高了冷却性能，还针对二者分别采取了发热对策。比如，马达改进了磁设计，逆变器采用了 SiC 功率元件。通过采用 SiC 功率元件，逆变器的损失较采用 Si 功率元件的原产品减少了一半。三菱电机计划首先于 2014 年投产采用 SiC 功率元件的逆变器，以及马达单独配置的电动汽车用马达系统。



图2：三菱电机的逆变器一体型马达系统
与逆变器和马达相互分离的原系统相比，体积减小了一半。

此外，罗姆和安川电机也共同试制了面向电动汽车的行驶系统（图3）。该系统由马达及其驱动部分构成。特点是，通过在驱动部采用罗姆的 SiC 功率元件，使驱动部分和马达实现了一体化。线圈切换部、逆变器以及配备栅极驱动 IC 和 MCU 等的控制器部分与马达部分组合在了一起。而使用 Si 功率元件时，马达部分和驱动部分是相互分离的。

此次试制的行驶系统以安川电机已经投产的电动汽车行驶系统“QMET”为基础，因采用了 SiC 功率元件，所以称为“SiC-QMET”。SiC 功率元件利用罗姆开发的沟道型 MOSFET 和 SBD。



图3：罗姆和安川电机试制的行驶系统
线圈切换部、逆变器部、配备栅极驱动 IC 和 MCU 等的控制器部的三部分与马达部分实现了一体化。

Car Audio System

车载音响

从事高级车载音响业务的 Bewith 公司在“第 42 届东京车展”(公众开放日:2011 年 12 月 3 ~ 11 日)上,演示了采用 SiC 制 SBD 功率放大器“A-110S II”的车载音响。

Bewith 在标致“308CC”和梅赛德斯·奔驰“SLR McLaren Road Star”的后备箱部分分别配备了多台这种功率放大器,实现了出色的音质效果(图 1, 2)。因为噪声小、音质清晰,“能够实现静谧与空灵的声音。无论是哪种类型的音乐都能无限接近原声”(Bewith)。

A-110S II 配备的 SiC 制 SBD 由新日本无线与 Bewith 共同开发。把两个名为“BD01”的 SiC 制 SBD 用在了向 A-110S II 的放大器电路供电的电源线路中。只需替代过去使用的 Si 制 SBD, 即可实现稳定供电。因放大器电路工作稳定, 所以提高了音质。

新日本无线介绍说, 实现稳定供电的理由大致有两点。一是与使用 Si 制 SBD 相比, 反向恢复时间控制到了约 1/3, 反向恢复电流控制到了约 1/4, 因此能够实现高速开关。电源对音量变化等负载变化的追随性得到提升。二是 SiC 结晶中的缺陷减少, 降低了缺陷带来的漏电流等因素。通常缺陷导致的漏电流存在时, 电源线路的白噪声就会增大。



图1：标致“308CC”的后备箱配备的功率放大器
功率放大器使用的SiC制SBD由新日本无线与Bewith共同开发。



图2：梅赛德斯·奔驰“SLR McLaren Road Star”的后备箱配备的功率放大器
通过采用SiC制SBD, 功放电路工作稳定, 有利于提高音质。

Railway

铁路

SiC 功率半导体以铁路应用为核心展开了激烈的开发竞争（图 1）。最先进行开发的是三菱电机。该公司于 2011 年 10 月宣布投产配备 SiC 制 SBD 的逆变器装置。主要用于铁路车辆的马达。现在该产品已经配备于东京地铁银座线“01 系”的部分车辆。

继三菱电机之后的是东芝。东芝 2011 年 12 月发布了采用 SiC 制 SBD 的逆变器装置。三菱电机和东芝的逆变器装置均采用额定电压为 1700V 的功率模块，面向架线电压为直流 600/750V 的铁路。之后，日立制作所于 2012 年 4 月发布了面向直流电压为 1500V 的架线，采用额定电压高达 3300V 的 SiC 制 SBD 功率模块的逆变器装置。

SiC 在铁路领域开始崭露头角的理由主要有四个。第一，可降低铁路车辆系统的电力损失。例如，

据三菱电机估算，与采用 Si 二极管时相比，铁路车辆系统整体的电力损失可降低约 30%。第二，逆变器装置本身可实现小型轻量化。这是因为，由于发热减少，冷却机构等可小型化。三菱电机认为，采用 SiC 制 SBD 可将逆变器装置的体积和重量削减约 40%。第三，Si 二极管的性能提高余地“越来越小”（多位功率元件技术人员）。原因是，与晶体管相比，二极管的构造比较简单。通过将材料换为 SiC，二极管的性能提高余地大幅增加。

第四，适合铁路领域以长期使用为前提的成本回收模式。以前，虽然 SiC 比 Si 特性出色而备受关注，但由于功率元件的成本高，只有部分产品采用。而铁路领域用途，即使导入成本稍高，如果长期而言能够削减使用成本，就容易得到采用。



所配备的功率模块的性能

- ▶ 额定电压为 1700V
- ▶ 额定电流为 1200A



东芝

- ▶ 同 1700V
- ▶ 同 1200A



日立制作所

- ▶ 同 3300V
- ▶ 同 1200A

图1：利用SiC的逆变器不断推出
三菱电机、东芝和日立制作所分别开发出了配备 SiC 二极管的逆变器装置。三菱电机和东芝的开发品额定电压为 1700V，日立制作所的开发品额定电压高达 3300V。（照片：中为东芝提供，右为日立制作所提供）

开关损失减少

这四个理由中份量最重的是电力损失的降低(图2)。铁路车辆系统的损失降低的理由是,(1)逆变器装置的开关损失降低、(2)再生时可回收的电力增加、(3)马达本身的损失降低。

首先,(1)可通过利用SiC制SBD降低开关损失。SiC制SBD在开关时的响应性优于Si二极管,因此三菱电机认为,IGBT接通时的电力损失可削减约55%,二极管的开关损失可削减约95%。

其次,(2)可回收的电力方面,只通过再生制动便可获得“制动力”的车辆速度范围扩大,因此能

增加可回收电力。例如,三菱电机以前的铁路车辆系统在时速超过35km~40km时,会同时启动机械式制动器和再生制动器。因为如果只利用再生制动器,Si功率元件的损失会增大,从而导致元件的接合温度迅速上升,甚至可能会超过容许温度范围。而如果是SiC功率元件,因其容许温度比Si高,所以“在时速为70km时也能只使用再生制动器。通过再生获得的电力能增至2倍”(三菱电机)。

通过采用SiC功率半导体器件,还有助于(3)中提及的降低马达损失。比如,使用感应马达时,能够进行高频开关驱动,使得流经马达的电流波形接近正弦波。仅此一举,感应马达的损失就能“降低约40%”(三菱电机)。

(a)电力损失的比较

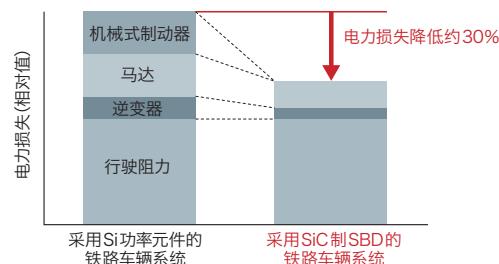
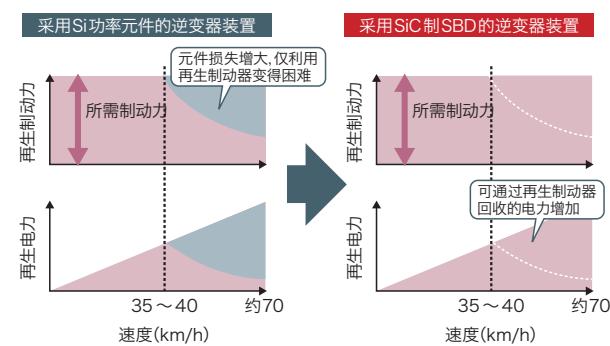


图2: 可降低电力损失

据三菱电机估算,利用SiC制SBD的铁路车辆系统与利用Si功率元件时相比,电力损失可降低约30%。另外,仅利用再生制动器即可获得所需制动力的速度范围扩大,因此能增加再生电力。(本图根据三菱电机的资料制作)

(b)再生制动器利用范围的比较



Photovoltaic System

光伏发电系统

三菱电机还利用 SiC 制 MOSFET 和 SBD 试制了用于太阳能电池的功率调节器（图1）。该功率调节器的作用是，高效提取太阳能电池模块发出的电力，并将其转换成易于使用的电力。

三菱电机试制的功率调节器的特点是，把集成有升压电路和逆变器电路的功率模块中所使用的功率半导体材料由原来的 Si 换成了 SiC。由此，与该公司采用相同电路构成的、利用 Si 功率半导体的中端功率调节器“PVPN50G1”相比，转换效率提高了 2 个百分点，达到了 98%。

不过，光把 Si 换成 SiC 并不会达到 98%，其实还改进了 AC 电抗器用部件的材料等。虽然在实际

测量中获得了 98.2% 的转换效率，但考虑到测量误差等因素，发布值为 98%（图2）。

在三菱电机推出的太阳能电池用功率调节器中，最高转换效率目前为 97.5%。这是通过组合使用 Si 功率半导体和分级控制的逆变器技术实现的。而全 SiC 试制品中则没有使用这种分级控制技术。现在，三菱电机正致力于 SiC 功率半导体与分级控制技术相结合。

除此之外，意法半导体还在微型逆变器的参考机型上配备了 SiC 制 SBD 产品“STPSC806G”，并实现了 95% 以上的电力转换效率。微型逆变器主要用于将功率调节器功能应用于各种太阳能电池模块。

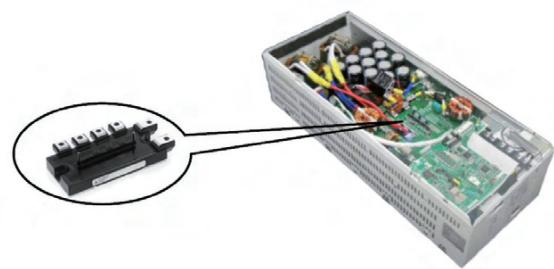


图1：用于光伏发电的功率调节器

三菱电机利用全 SiC 功率模块，试制了光伏发电用功率调节器。
(照片：三菱电机)

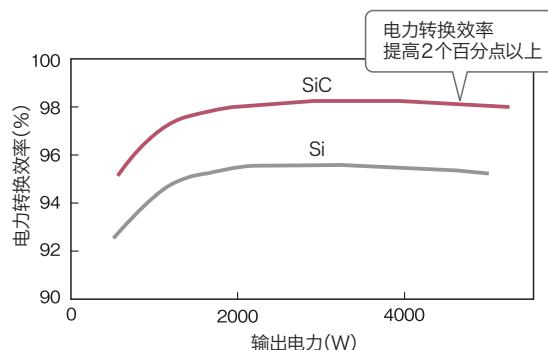


图2：转换效率为98%

利用 SiC 功率半导体将转换效率提高了 2 个百分点，达到 98%。
(本图根据三菱电机的资料制作)

Home Appliance

家电产品

在家电产品中，空调已有采用 SiC 制 SBD 的先例。三菱电机 2010 年 10 月下旬上市的空调“雾峰 MoveEye MSZ-ZW 系列”的 10 款机型中，额定输出功率为 2.8kW 和 3.6kW 的两款机型的压缩机逆变器就采用了 SiC 制 SBD（图 1）。该公司虽然没有公布配备机型的量产数量，不过额定输出功率为 2.2kW 至 7.1kW 的 ZW 系列整体的月产量计划为 2 万台。采用 SiC 制 SBD 导致的成本增加部分“由公司负担，不会转嫁到产品中”（三菱电机）。

不过，节能方面的效果光凭导入 SiC 制 SBD 是有限的。“仅 SiC 制 SBD 只能将逆变器的电力削减约 15%，空调整体削减约 2%”（三菱电机）。要想实现更大的节能效果以及使功率模块大幅小型化，

需要将产品中的功率半导体全部换成 SiC（图 2）。为此，就需要将 IGBT 换成 SiC MOSFET。

三菱电机决定在空调中配备 SiC 制 SBD 的原因与其说是为了节能效果，不如说是为了 SiC 产业的活性化以及在与其他公司的竞争中取胜。三菱电机表示，“目前，SiC 晶圆实际上是由美国科锐垄断。这导致 SiC 晶圆的价格居高不下。我们如果能打入市场推进 SiC 的实用化，就可以刺激其他 SiC 晶圆厂商的参与欲望，通过竞争大幅降低 SiC 晶圆的价格”。

试制无线供电系统

家电领域的其他应用案例方面，罗姆 2011 年试制出了采用 SiC 功率半导体的无线供电系统。该系



图1：在空调中配备SiC制SBD

照片是在部分逆变器中利用 SiC 制 SBD 的三菱电机空调“雾峰 MoveEye MSZ-ZW 系列”。

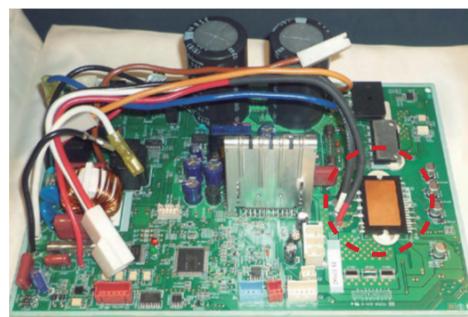


图2：逆变器模块

空调配备的逆变器基板。红色虚线内为安装有 SiC 制 SBD 的逆变器模块。

统采用“电场耦合方式”，在发送端的逆变器电路中采用了SiC制沟道型MOSFET（图3）。由此，以6.78MHz的高开关频率，使逆变器获得了高达95%的转换效率。

罗姆试制的系统可供电50W左右。该公司演示了利用无线供电点亮墙壁上的有机EL照明器具和桌上的台灯，并为桌上的智能手机电池充电的情形。

不过，该试制系统只是为了宣传SiC功率元件的特点而进行的技术展示，并不表示罗姆将涉足无线供电系统。罗姆没有公布无线供电开发企业的详情。



图3：配备于无线供电系统
发送端的逆变器电路中利用了SiC制沟道型MOSFET。

NE 手册系列 功率半导体

发行	日经BP社 〒108-8646 东京都港区白金 1-17-3 NBF Platinum Tower
发行日期	2012 年 9 月
编辑	《日经电子》
编辑协助	山下胜己=特约撰稿人
翻译	日经技术在线! 编辑部
设计・制作	日经BP咨询
印刷	图书印刷
赞助	罗姆半导体集团

© 日经BP社 2012

未经允许禁止转载・翻印本书内容 Printed in Japan



罗姆半导体集团
www.rohm.com.cn