



白皮书

深入了解博世的碳化硅(SiC)半导体技术

博世是汽车行业领先的半导体供应商之一。并提供基于创新材料碳化硅(SiC)制成的功率半导体, 包括裸片和分立器件, 以及集成在功率模块和全面电气化及移动出行解决方案之中。博世在用于汽车市场的MOSFET和碳化硅领域拥有逾20年的专业经验。

Inhalt

01

摘要	3
----------	---

02

汽车和半导体经验的结合	4
-------------------	---

03

全球生产及合作伙伴网络	6
-------------------	---

04

路线图和技术	8
--------------	---

碳化硅路线图	8
--------------	---

双通道沟槽概念	9
---------------	---

衬底	14
----------	----

面向未来拓展碳化硅：过渡至200毫米晶圆尺寸	15
------------------------------	----

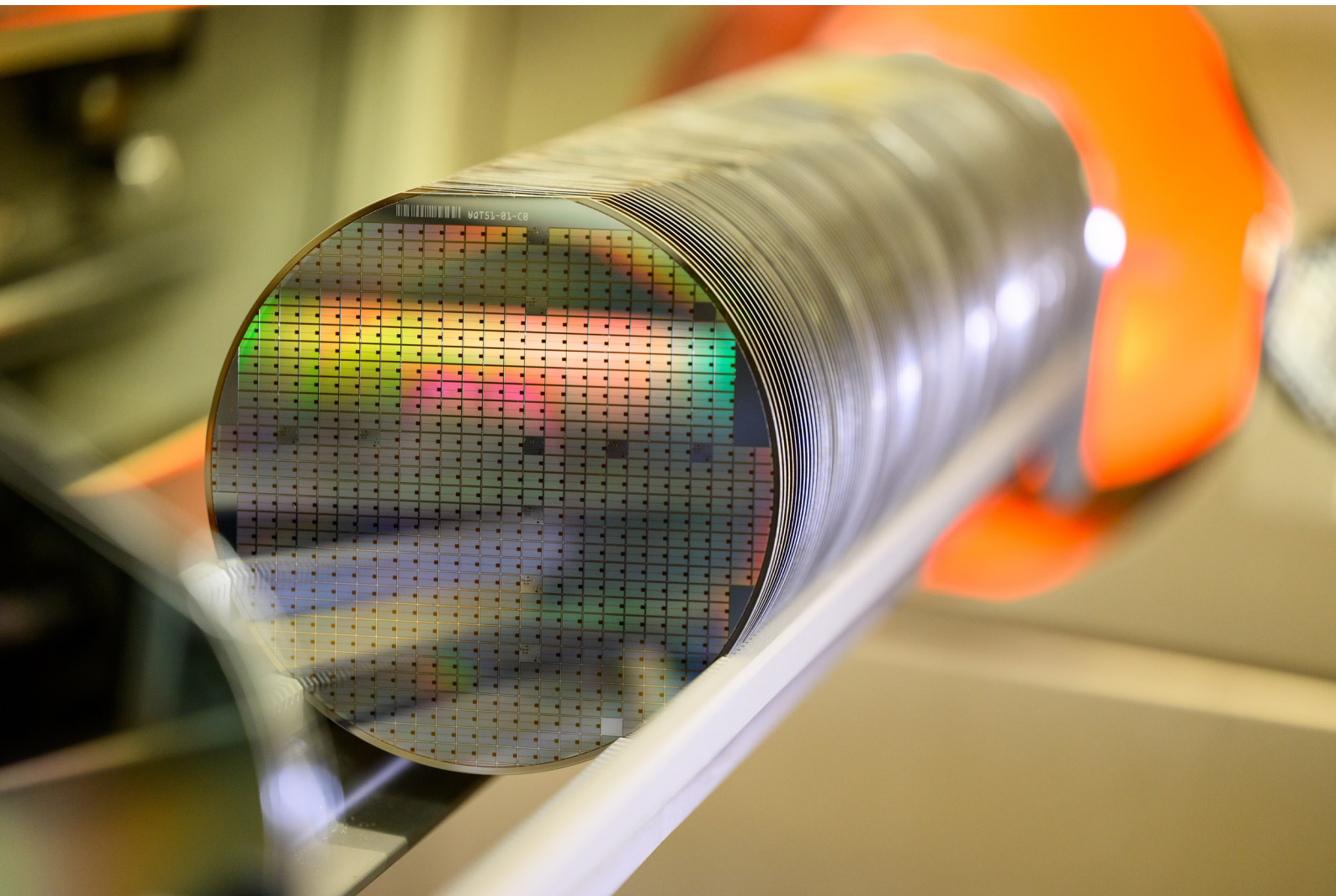
05

博世的碳化硅产品组合	18
------------------	----

01

摘要

本白皮书探讨了博世在汽车应用领域的碳化硅(SiC)半导体技术。凭借超过20年的碳化硅研发经验, 博世可提供从裸片到集成解决方案的全面产品组合。白皮书涵盖了博世的双通道沟槽MOSFET技术、衬底创新以及向200毫米晶圆尺寸过渡的进程。并聚焦博世在全球范围内的制造能力和合作伙伴网络, 彰显了博世面向未来汽车技术领域持续创新和保障供应链安全的坚定承诺。



02

汽车和半导体经验的结合

与其他公司不同, 博世将汽车与半导体领域的专业知识紧密结合, 开发出强大的电子系统。正是这一深厚的汽车行业系统知识, 使博世能够为特定目标应用开发定制化的半导体解决方案。这使博世能够针对半导体创新, 并通过产业化的规模经济创造竞争优势。凭借60余年的经验积累、覆盖全球的制造和合作伙伴网络, 以及在研发和生产方面的持续投资, 博世现已成为行业领先的汽车半导体制造商之一, 并正在塑造当今移动出行的未来。

博世在半导体领域集研发、生产和销售于一体, 并将自己定位为集成设备制造商(IDM)。博世预计到2035年, 每辆新车中将集成超过40颗博世芯片。

目前, 博世可研发和生产MEMS传感器、集成电路、专用集成电路和专用片上系统(AsSoC), 此外, 博世也是全球少数几家能够开发并量产碳化硅(SiC)功率半导体的汽车供应商之一。

博世在车用MOSFET和碳化硅领域拥有超过20年的经验。博世于2001年即开始碳化硅半导体的研发, 并于2011年推出了首个MOSFET产品原型。

自2019年以来, 博世进一步拓展了在外部市场的布局, 现在也作为独立的半导体供应商运营: 博世将碳化硅MOSFET产品以裸片、分立器件和功率模块的形式直接销售给整车厂、一级和二级供应商以及分销商。产品覆盖标准解决方案和面向单个客户项目的特殊布局的定制碳化硅半导体。这使得博世成为世界上为数不多的在半导体领域(尤其是碳化硅领域)拥有高灵活度的汽车行业制造商之一。

目前, 许多整车厂正在建立垂直整合能力。他们对具有竞争力的元器件的需求越来越大。博世凭借自有的半导体生产体系及作为汽车供应商的专业经验, 可为其提供最佳支持。多年来, 博世在半导体领域积累了丰富的经验——例如半导体生产生产工艺开发和动力总成芯片应用需求等方面。对于那些自行定义其电子电气架构的汽车制造商而言, 通过与博世携手, 不仅可享受最大程度的灵活性, 还能获得一个平等合作伙伴的支持。

裸片: 指未封装的单颗芯片, 常用于如逆变器功率模块等高性能应用场景。

分立器件: 指已封装在塑封材料中的芯片, 典型应用包括车载充电器或DC/DC转换器中, 与印刷电路板直接连接使用。

博世与中国汽车市场： 面向未来的战略合作伙伴关系

随着中国成为全球最大的汽车市场，中国对于博世的重要性日益凸显，并与欧洲本土市场和美国增长市场并驾齐驱。中国电动出行市场的发展速度在全球遥遥领先，并正在为电气化树立新标准。预计到2035年，中国道路上行驶的汽车中将有一半是纯电动汽车。目前，博世已与几乎所有的中国汽车制造商以及众多在华运营的国际车企保持密切合

作。例如，博世的碳化硅芯片已广泛应用于全球最大的电动汽车制造商比亚迪的供应链中，并在多款高端车型中得到重点使用。同时，博世也是长城汽车碳化硅产品的核心供应商。2022年，博世与长城汽车及其合作伙伴组建的合资公司芯动签署了碳化硅长期供货协议。而小米首款车型SU7的电驱动系统核心部分亦采用了博世提供的400V碳化硅电驱桥。

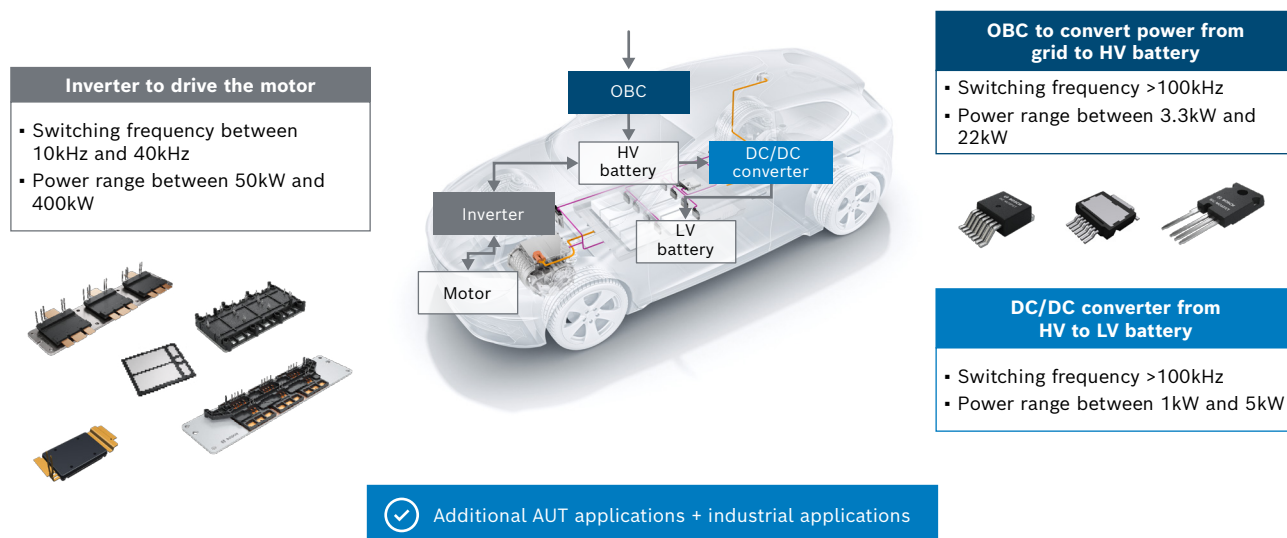
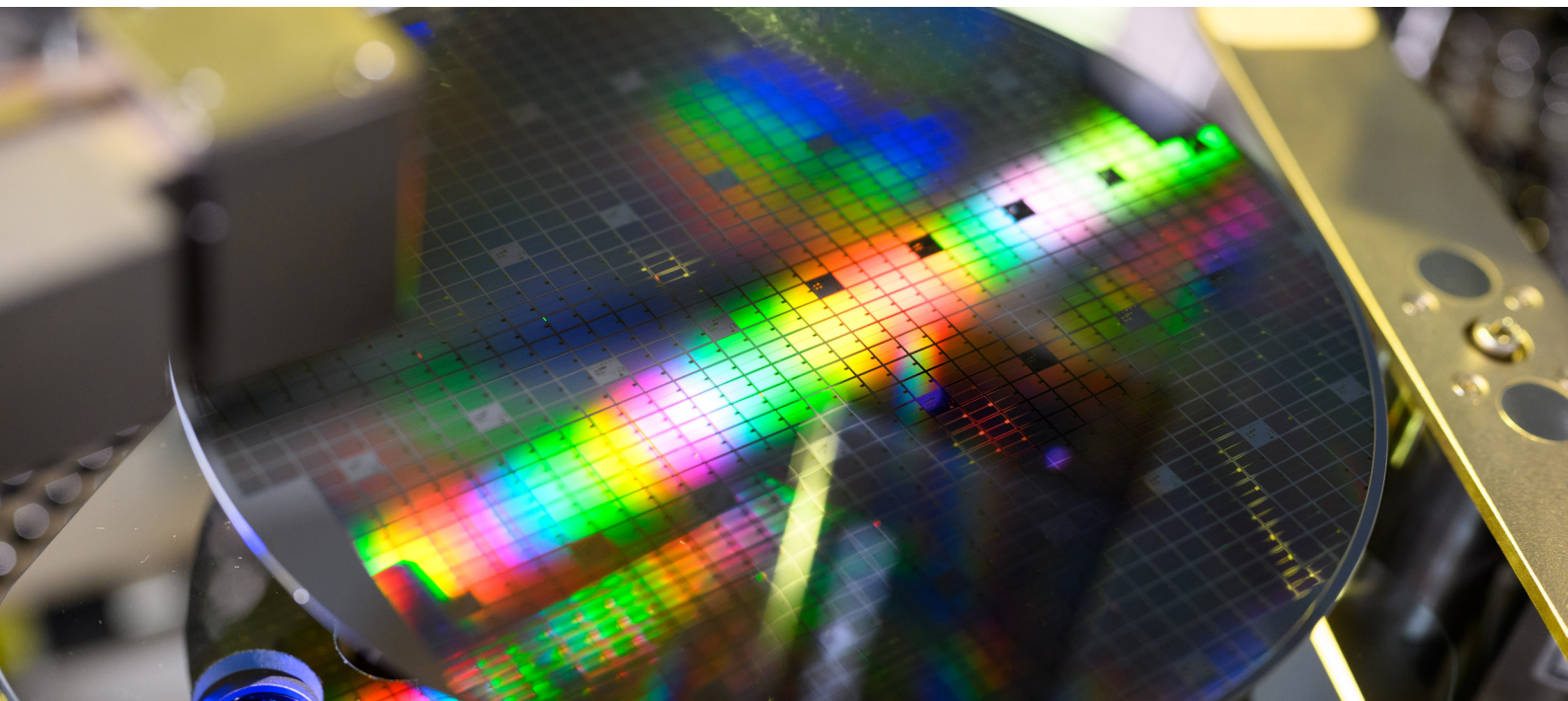


图1 碳化硅在汽车中的主要应用



03

全球生产及合作伙伴网络

博世在选址和全球合作伙伴网络方面的战略布局，对于生产能力、创新驱动、贴近客户以及提升供应链安全至关重要。这种全球化与差异化的战略重点，使博世能够强化半导体在全球市场的可获得性，推动创新并为当地市场提供更快、更可靠的解决方案。

博世拥有涵盖制造与测试的全球化战略网络，以确保最高品质标准和可靠的供应。除了晶圆厂，博世还运营多个测试中心。

在这里，芯片经过全面测试，以确保其性能、可靠性和符合严格的汽车标准。凭借其遍布全球的前端和后端制造环节的半导体网络，博世在全球范围内都具备强大的运营优势。

博世的全球半导体网络还通过众多硅晶圆代工合作伙伴和专业封测厂得以进一步延申。与多家国际合作伙伴的协同，不仅有助于确保供应链安全，还能提高半导体在全球范围内的可获得性。



自 2021 年底以来，博世一直在其罗伊特林根工厂量产基于 150 毫米晶圆的第三代碳化硅芯片。



04

路线图和技术

碳化硅路线图

博世针对750V和1200V电压等级的碳化硅技术路线图能够在长期内有效支持其市场定位。博世每2至2.5年就会推出一代全新产品。与上一代相比，每一代产品的关键性能指标都有显著提升。每一代碳化硅MOSFET都展现出更高的功率密度，及更好的开关特性，同时保持甚至提高其鲁棒性。除了

在碳化硅功率MOSFET的元胞结构上不断改进，博世还致力于为客户提供更多功能创新，例如增加了集成传感功能或替代功率表面镀层等——始终为客户提升产品易用性和灵活性为根本目标。

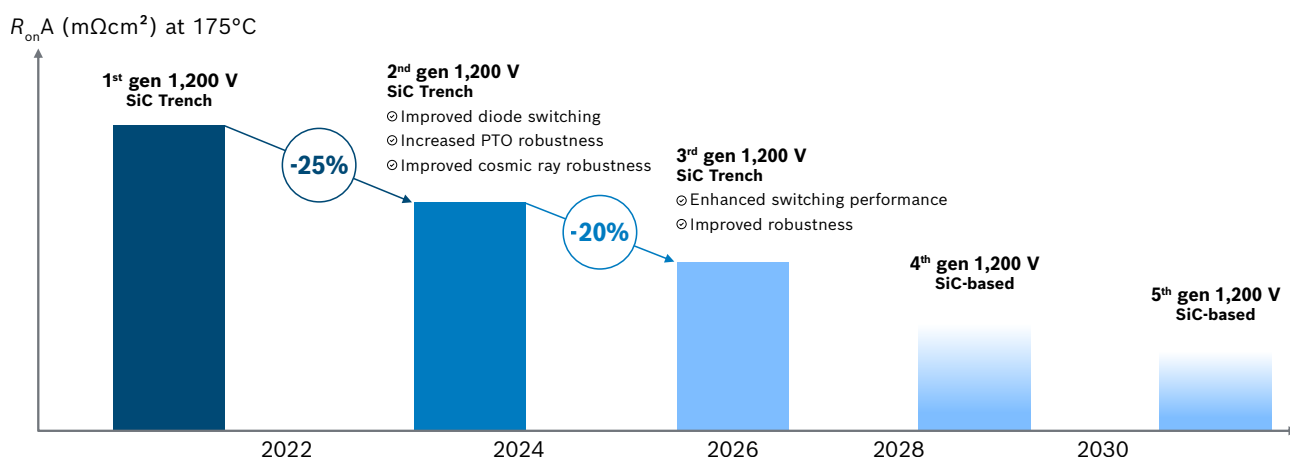


图2 1200V路线图

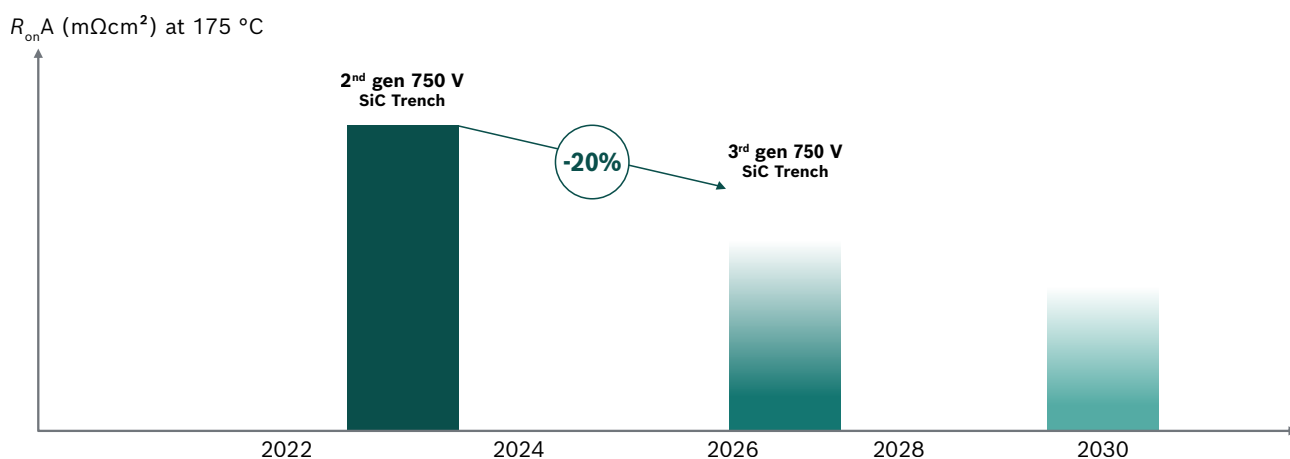
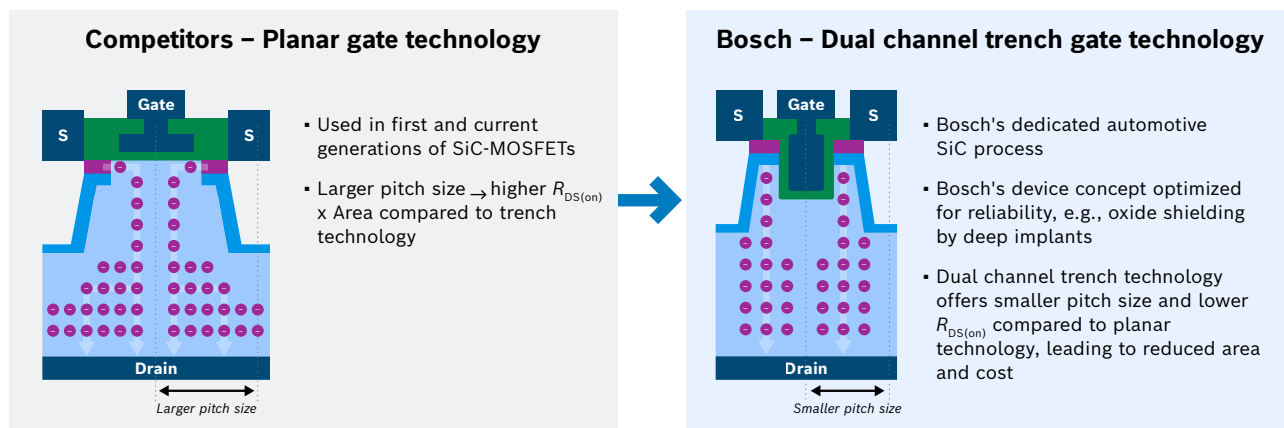


图3 750V路线图

双通道沟槽概念



The first generation of 1,200 V SiC MOSFET devices from Bosch has one of the best performances on the market regarding $R_{DS(on)} \cdot A$ and $R_{DS(on)} \cdot Q_g^1$

1) Source: SiC Transistor Comparison report, Yole Group, 2024

图4 博世目前在罗伊特林根的150毫米晶圆厂大批量生产碳化硅MOSFET。这些器件基于博世专有的先进双通道沟槽栅极MOSFET设计和制造工艺，比传统的平面栅极技术更具优势。

对于现代碳化硅MOSFET在汽车功率应用中至关重要的三个方面：

- 设备性能和鲁棒性；
- 碳化硅衬底质量控制；
- 先进制造。

碳化硅MOSFET主要有两种结构：平面栅和沟槽栅MOSFET。平面结构中栅极由栅电极和栅氧化层构成的复合结构位于器件表面；晶体管通道中的电流沿横向流动。相比之下，沟槽MOSFET中的栅极复合体处于垂直沟槽结构中，电流垂流通过通道。沟

槽栅极可显著减小元胞面积(间距尺寸)，并降低功率芯片的面积需求(提高功率密度)。这是沟槽架构相对于平面架构的关键优势。为了使沟槽架构发挥最大性能，博世开发了双通道沟槽技术，该技术能够实现高静态与动态性能的独特结合，同时具备高可靠性及鲁棒性，适用于对寿命要求高的应用。与单通道架构相比，双通道技术在每个沟槽的侧面使用两个电子通道。这将通道电阻减半成为可能。而通道电阻是整个器件电阻中最重要的组成部分之一。



双通道沟槽技术可提高使用寿命和耐用性

碳化硅沟槽技术的性能优势毋庸置疑,但在可靠性和稳健性方面仍需特别注意。博世致力于零缺陷战略和以可靠性为中心的设计,确保其碳化硅功率器件在电动汽车的整个使用寿命期间安全稳定地运行。

任何MOSFET技术的弱点都是栅极氧化物。通过使用双通道沟槽技术,栅极氧化物可以在晶体管关闭状态下非常有效地屏蔽高电场,同时通过精心控制栅极氧化物工艺实现导通状态下的高可靠

性。因此,博世双通道沟槽技术使得功率器件的使用寿命远远超出了典型的工作寿命,为达成最低FIT(单位时间故障率)目标提供充分冗余。另一个重点是确保博世的碳化硅MOSFET中使用的栅极氧化物也具有非常低的阈值电压漂移。通过这种最小的偏移,即使在极高寿命需求的应用中,这种微小漂移也能使开关操作、导通与开关损耗保持在功率模块的设计窗口内,并支持更高性能的设计。在牵引逆变器等采用负栅压关断的典型场景中,博世的碳化硅MOSFET仍能维持低漂移特性,充分验证了其栅氧化层的高可靠性及对汽车应用的深度适配。

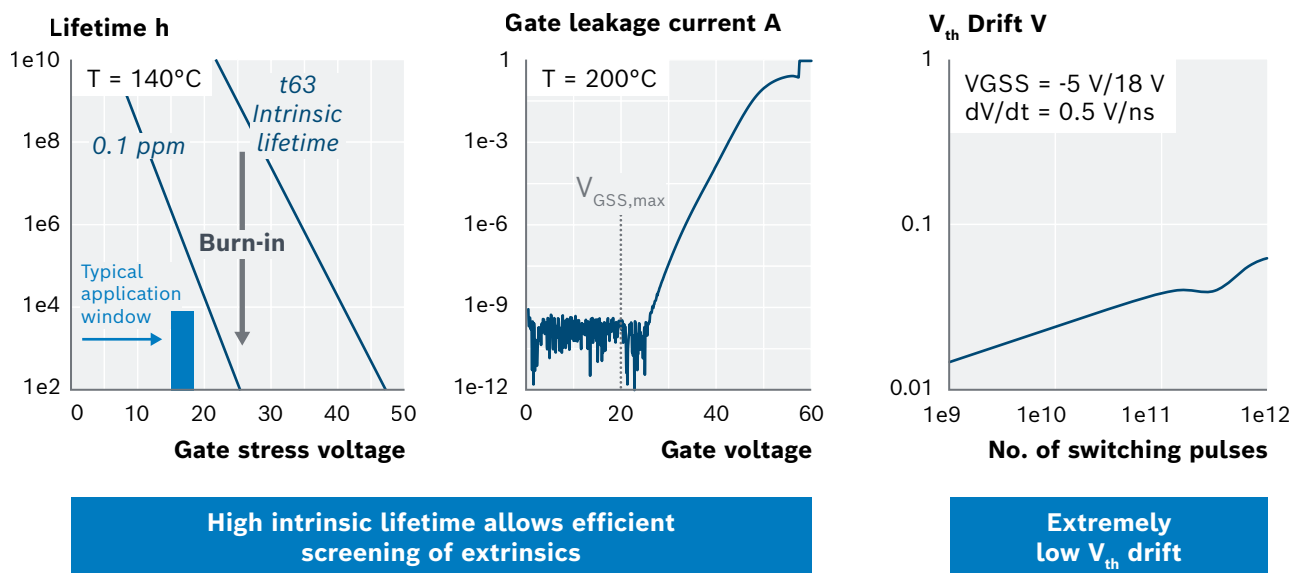


图5 博世的碳化硅MOSFET中栅极氧化物的典型寿命、漏电流和 V_{th} 漂移。



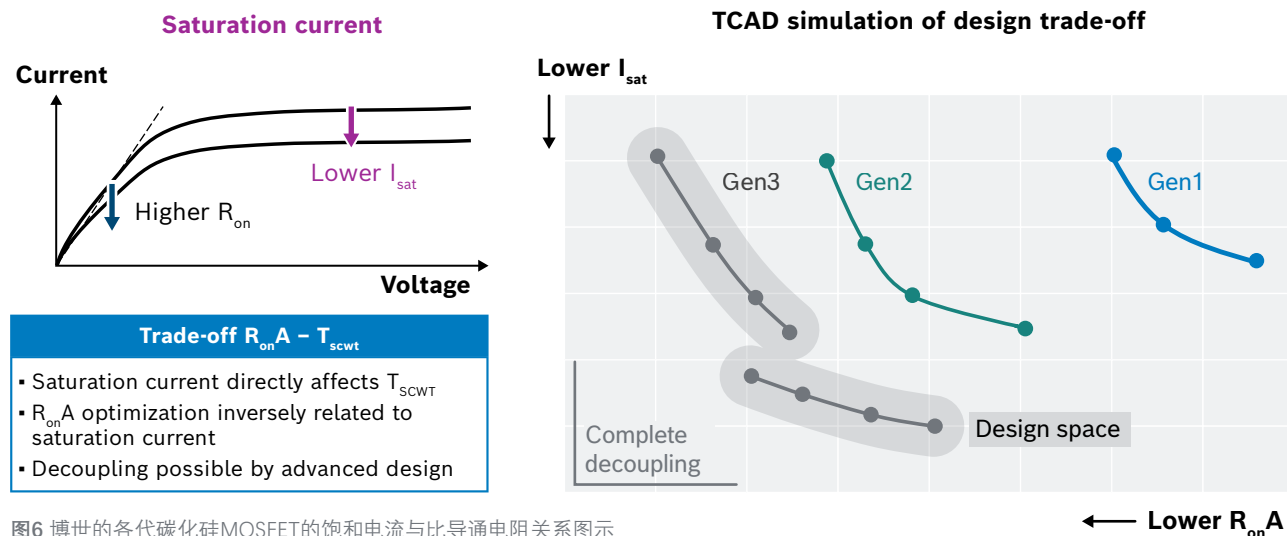


图6 博世的各代碳化硅MOSFET的饱和电流与比导通电阻关系图示

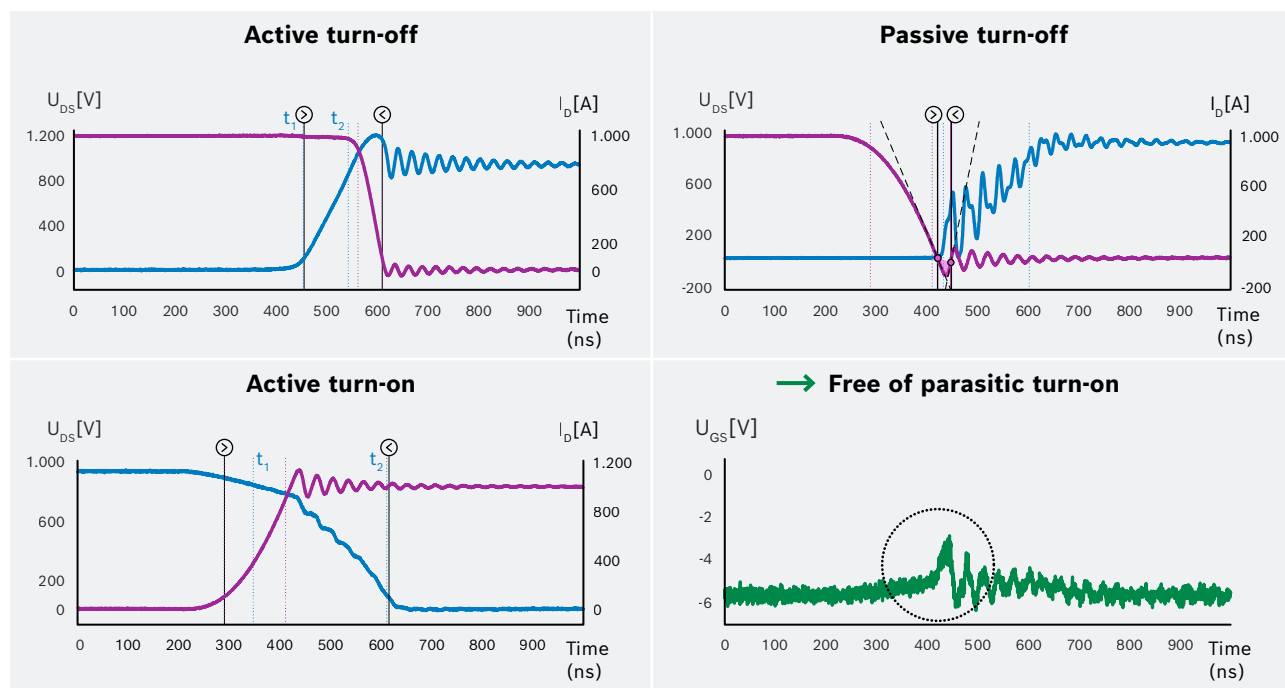
性能与短路鲁棒性的优化平衡

在功率器件设计中, 器件性能与鲁棒性之间始终存在权衡关系。博世通过代际技术革新, 显著优化了比导通电阻(与特定电流下的芯片面积等效)和饱和电流(与短路鲁棒性提升等效)等关键参数的平衡关系。对于汽车牵引逆变器等应用场景, 理想的解决方案需在低比导通电阻(缩小芯片面积)和低饱和电流条件下实现高电流承载能力, 同时确保足够的短路鲁棒性以满足严苛工况需求。

在发生短路事件时, 碳化硅芯片需要能够在一定时间内处理非常高的电流(饱和电流)。这个时间被称为短路耐受能力。为了有足够的时间防止芯片被损坏(即关闭芯片或降低电流), 碳化硅芯片的内部短路承受能力需要比检测短路事件所需的时间加上栅极驱动器的反应时间加上关闭芯片所需的时间更长。良好的碳化硅功率MOSFET设计可确保必

要的短路耐受能力的同时, 保持较低的比导通电阻。通过低寄生电感的模块设计和采用先进的栅极驱动解决方案(如博世的专用碳化硅栅极驱动器), 可缩短检测和响应时间进一步降低了碳化硅MOSFET的固有短路耐受能力。这使得权衡关系可以向更高性能方向推进。

作为一家同时开发、制造和使用碳化硅MOSFET的系统供应商, 博世通过技术定制实现了器件特性与应用场景的深度适配。对于汽车牵引逆变器, 可实现软恢复, 在整个温度范围内展现出优异的反向恢复特性, 并具备对最大 dV/dt 的良好可控性。最新一代的博世的双通道沟槽技术即使在高 dV/dt 下也能消除不必要的寄生导通效应, 有效抑制了栅源极间的容性耦合干扰。



Optimized switching behavior

- Soft recovery over complete temperature range
- Very good controllability of maximum dV/dt
- No parasitic turn-on even at high dV/dt

图7 博世第三代碳化硅MOSFET工程样品在模块中的开关曲线(1000A/920V)。

博世深谙汽车应用需求, 并将广泛的系统知识反馈到碳化硅MOSFET开发中。器件参数的定义遵循应用要求。例如, 博世的碳化硅MOSFET的击穿电压是由FIT率定义的, 其根源来自于宇宙空间的辐射。宇宙辐射在接触地球大气时会产生中子, 这在标准汽车应用中是不可避免的, 可能导致高压器件的彻底失效。这些粒子可在器件处于关断状态时穿透器件并造成损伤。因此, 器件本身需要设计为具有较高的抗宇宙辐射能力和足够高的击穿电压。在显著抑制其他失效模式的基础上, 宇宙辐射影响导致的单事件烧毁对FIT率具有决定性作用。这种方法可确保终端实际应用中实现较低的FIT

率。此外, 可以利用超过电压等级额定值的瞬态过电压来提高快速切换条件下的切换性能表现。通过这一方式, 稳健的设计不仅确保系统可靠性, 还能在性能几乎无损的前提下, 为应用带来额外优势。

仅凭碳化硅MOSFET的器件电压等级(如 750 V、1200 V)无法完全判定其是否适配特定应用场景。深入理解失效模式是确保器件在常规工况与极端条件下鲁棒性的关键, 这种认知使得在最大化性能的同时不牺牲可靠性成为可能。

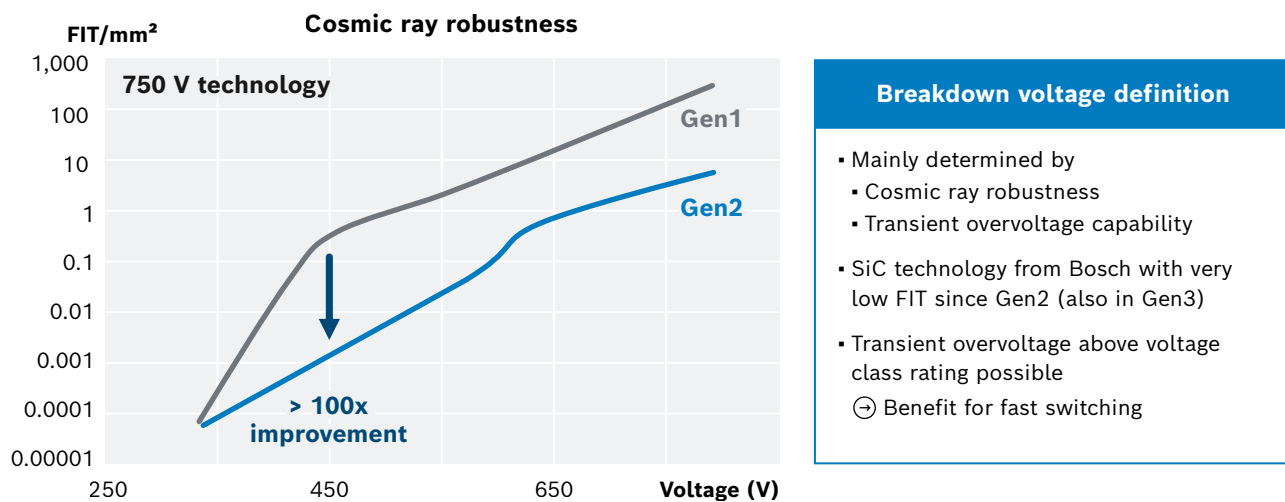


图8 在宇宙射线照射下, Gen1和Gen2架构中博世的碳化硅MOSFET在不同漏极电压下的示例性FIT率。



衬底

衬底是碳化硅半导体器件的基础。该原材料对芯片的良率和整体成本具有显著的影响。碳化硅晶体含有大量缺陷, 这些缺陷可能对器件产量至关重要, 取决于它们的具体性质。一些缺陷可能会在电气测试或电气应力期间导致致命故障。深入了解碳化硅原材料中的缺陷、检测手段及其对器件的影响, 是实现高良率器件生产和保障终端应用可靠性的核心要素。博世持续调查了碳化硅衬底的整个供应链, 包含原材料、晶体生长和晶片切割的设备和耗材。

博世全面的衬底分析

博世对所有主流供应商的衬底质量和成熟度都有着深入的了解。为了分析这些参数, 博世在其工厂中安装了专用的计量工具, 例如非常强大的X射线拓扑成像(XRT), 该分析仪配有专用软件来分析衬底的缺陷密度。图11显示了来自不同供应商的200毫米材料的XRT分析结果。图中显示了10多家不同200毫米衬底供应商的材料, 即螺旋位错(TSD)和基底面位错(BPD), 不同供应商缺陷程度有显著的差异。对衬底质量和供应商成熟度的深入了解使博世能够从大量潜在供应商中战略性地选择最佳供应商。

为确保不间断的衬底供应, 博世根据多来源和多地点战略建立了多元化的供应商组合。博世在多个地区建立多元化的供应商, 可显著降低其受地缘政治紧张局势和可能的贸易壁垒影响的风险。自2024年起, 博世已在其德国罗伊特林根(Reutlingen)工厂采用先进激光切割工艺, 通过对碳化硅晶体进行晶圆切片, 自主生产部分200毫米的薄型基片。

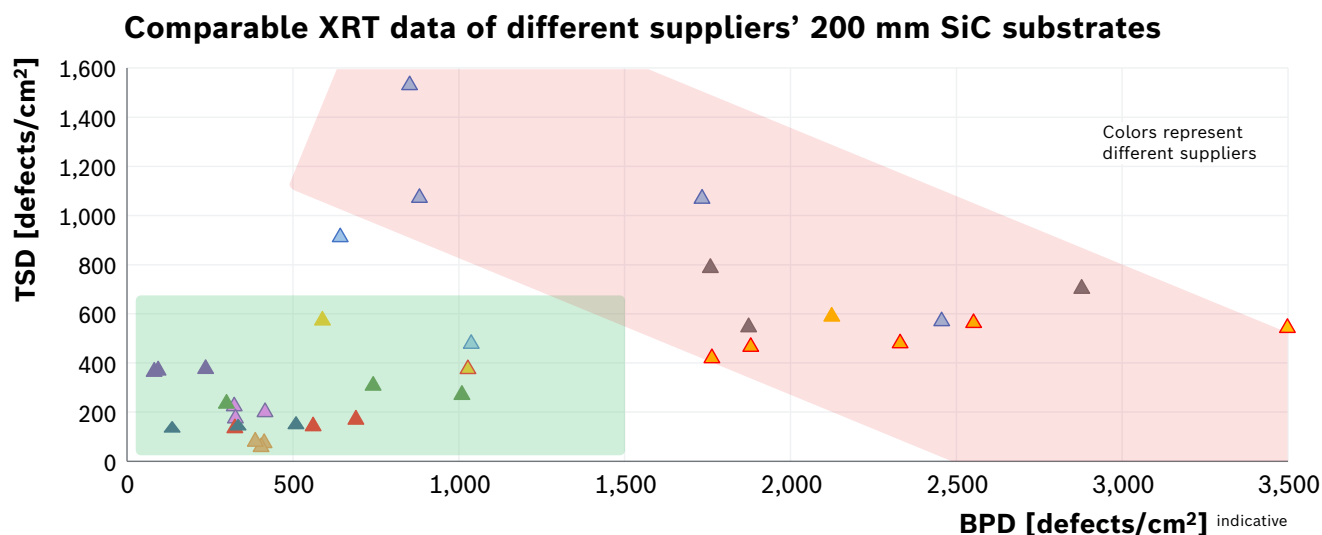


图9 2022年和2023年对10多家不同的200毫米供应商进行缺陷分析。

面向未来拓展碳化硅：过渡至200毫米晶圆尺寸

碳化硅生产技术从150毫米晶圆尺寸过渡到200毫米晶圆尺寸，对于降低SiC功率芯片成本和持续提高器件性能至关重要。博世的双通道碳化硅沟槽技术促成了在200毫米晶圆上生产出首款碳化硅沟槽MOSFET，首批样品用于批量生产的电动汽车中的客户认证和评估。这凸显了博世作为200毫米碳化硅技术早期应用的强势地位及其在碳化硅沟槽技术方面的高水平工艺控制。

如前所述，材料质量控制对于成功过渡到更大的晶圆至关重要。通过在衬底和外延(epi)上使用广泛

的缺陷表征工具，可以实现精确的良率预测。致命缺陷(killer defects)及其可能导致的芯片失效可被提前识别，从而可以在早期阶段评估和监控衬底以及外延质量。这些措施使博世能够提高200毫米衬底质量，甚至超过150毫米碳化硅衬底质量。因此，过渡到200毫米可以充分利用每个晶圆上更多碳化硅芯片的优势。

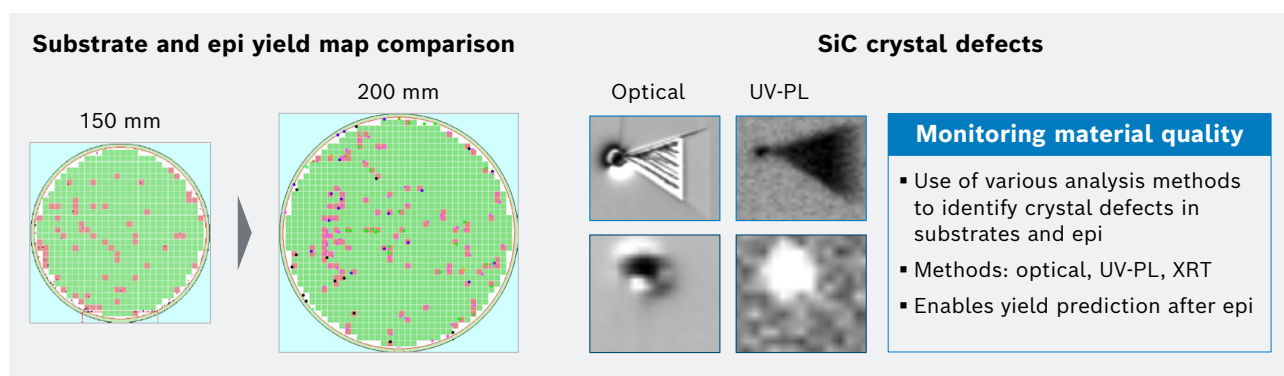
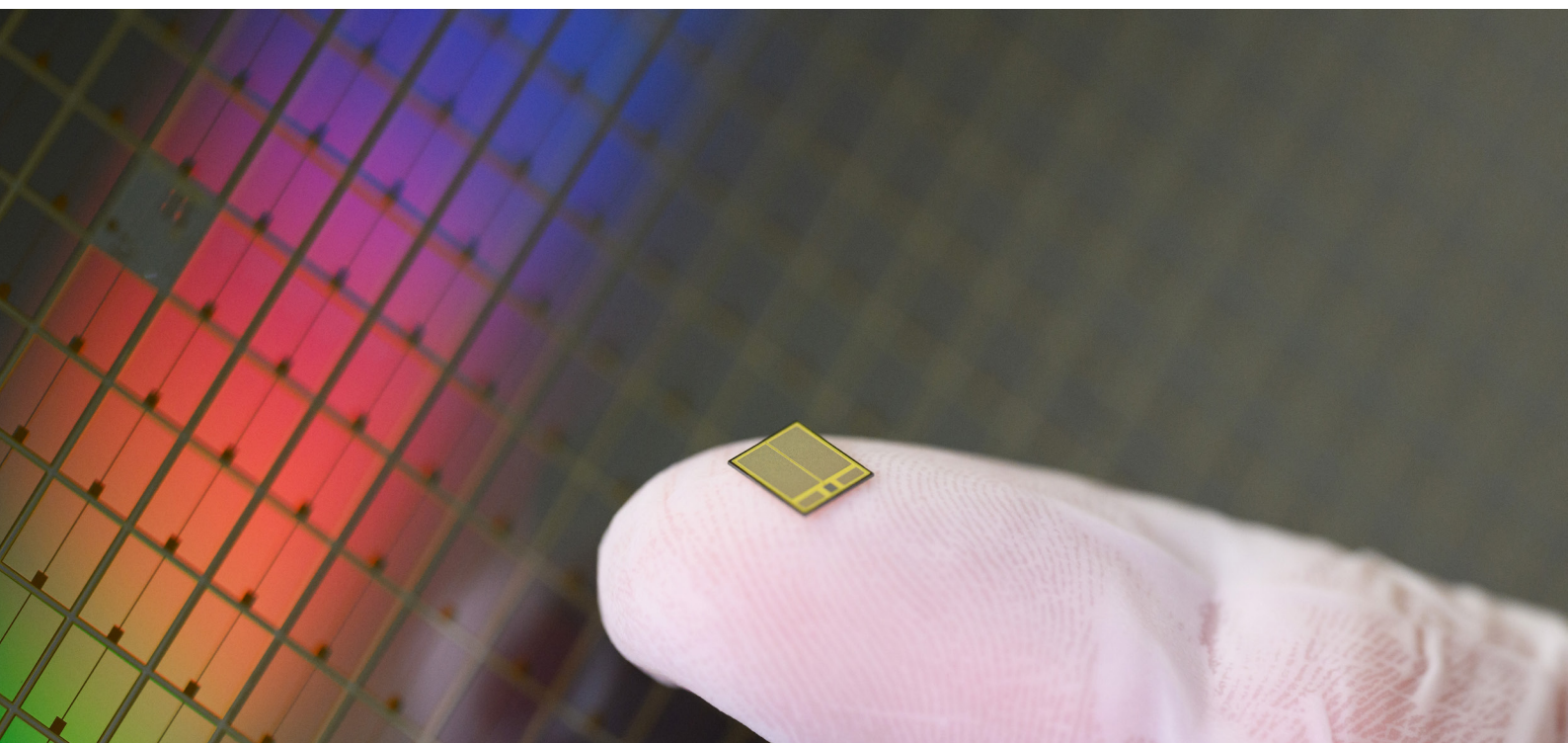


图10 对150毫米和200毫米碳化硅晶片进行缺陷分析后，进行示例性的外延产量预测。



工艺改进和先进的芯片设计

除了每片晶圆上良品芯片数量增加外, 向200毫米技术的过渡还为工艺改进和设备设计带来了好处。使用更先进的新一代200毫米设备可以显著提高工艺均匀性。如图11所示。以厚硬掩模蚀刻工艺为例, 200毫米晶圆上的该工艺在晶圆内的均匀性得到了极大改善。这同样适用于其他关键工艺, 例如光刻, 这得益于典型200毫米设备上更好的对准精度以及更小的关键尺寸。增强的工艺能力使得芯片设计可以采用更激进的方案, 并实现更窄的公差要求。

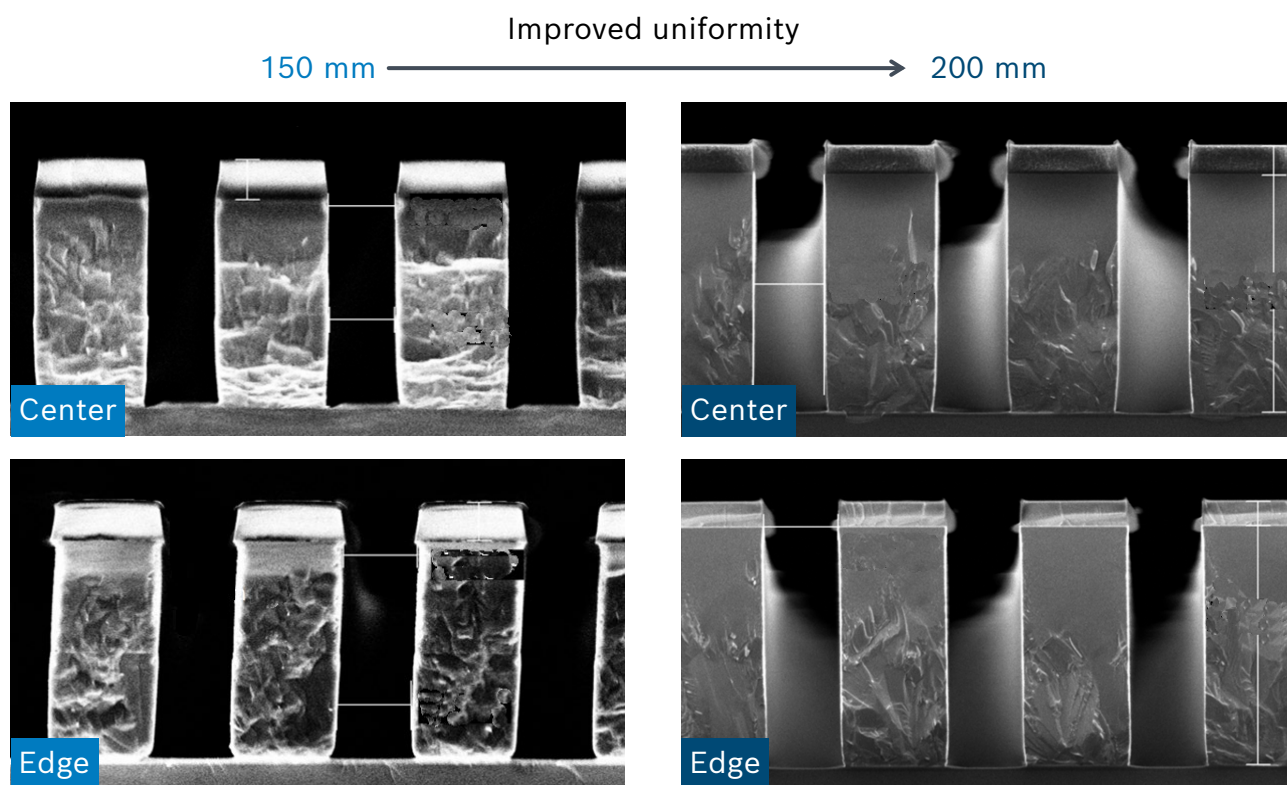
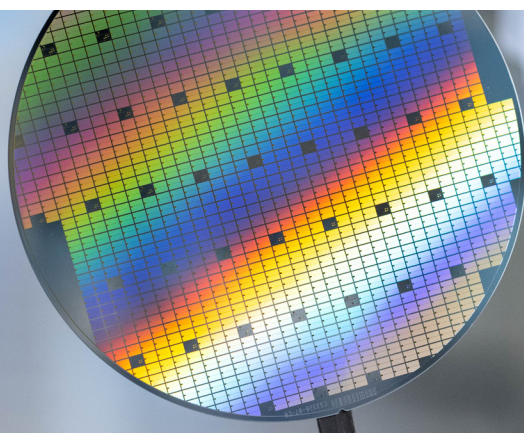


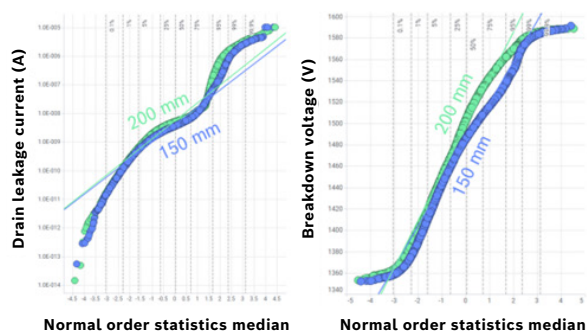
图11 在150毫米和200毫米碳化硅晶片上进行离子注入的硬掩模均匀性示例。



成功的技术转型

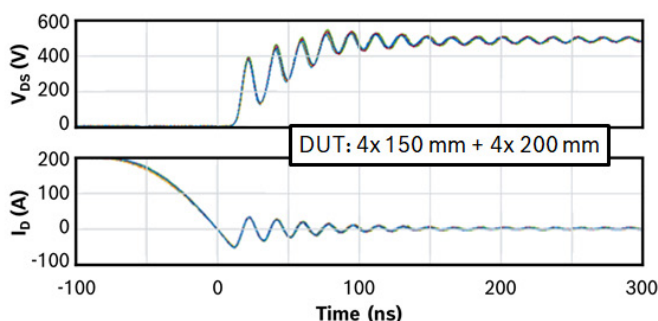
关键电气参数一致是从一个晶圆尺寸到更大晶圆尺寸技术成功过渡的最终证明。图12显示了在150毫米和200毫米晶圆上制造相同碳化硅功率晶体管设计的漏极漏电流分布的比较。正态概率图中的高度表明晶圆和外延材料的缺陷密度非常相似。博世在所有关键器件参数上都实现了这种高度匹配，证明了从150毫米到200毫米碳化硅的工艺过渡成功。此外，对于同一款碳化硅MOSFET设计，在150毫米和200毫米晶圆上制造的器件之间的开关曲线(此处为被动关断曲线)对比显示，150毫米晶圆上的4个器件与200毫米晶圆上的4个器件之间没有明显差异。这强调了向更大晶圆尺寸的工艺过渡的成功，并验证了利用上述改进工艺优势的基础已经具备。

Matching of static performance



Shown here: distribution of I_{DSS} and V_{BD}

Matching of dynamic performance



Shown here: passive switching

图121 50毫米和200毫米晶圆上制造的相同碳化硅功率晶体管设计的漏极漏电流、击穿电压和动态特性分布比较示例。

05

博世的碳化硅产品组合

博世为汽车行业提供定制的碳化硅解决方案-功率MOSFET和功率模块, 适用于各种应用, 例如逆变器、DC/DC转换器或车载充电器。博世的碳化硅MOSFET可作为裸片和分立器件以各种标准封装形式提供, 也可作为功率模块提供。所有产品的电压等级均为1200V和750V。

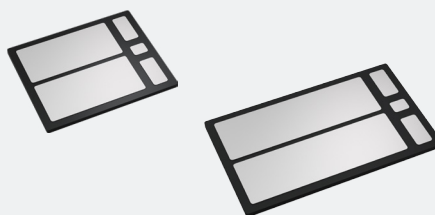
裸片

对于想要将自己的设计集成到功率模块中的客户, 博世提供具有不同布局和尺寸的裸片, 以确保最大的灵活性。电压等级为1200V的第二代裸片有8mOhm、9mOhm、11mOhm和13mOhm等型号。此外, 第一代和第二代还提供22-50mOhm范围内的更高欧姆裸片。

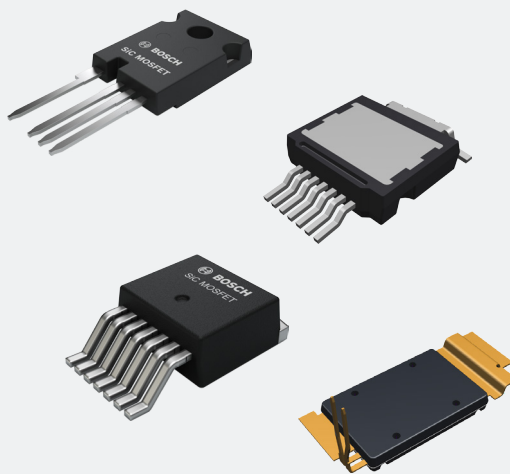
对于750V电压等级, 可提供5mOhm和6mOhm的第二代裸片。此外, 还有13mOhm和28mOhm的更高欧姆型号。

客户可以选择不同的表面镀层和附加设计元素。还可根据要求提供定制布局。所有裸片的设计最高温度为175°C, 在200°C下可工作100小时, 并符合AEC-Q101认证标准。

SiC bare dies for inverters



SiC discretes for power conversion (e. g. DC/DC converter, on-board-charger)



SiC B6 modules on cooler

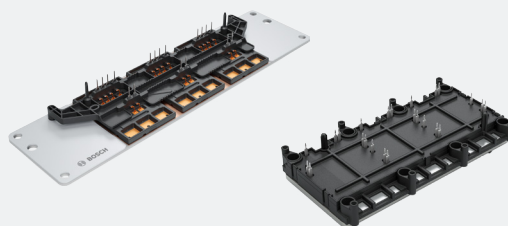


图13 博世客户可以从广泛的碳化硅MOSFET组合产品中进行选择。

分立器件

分立式碳化硅MOSFET针对DC/DC转换器、充电器(车载充电器)或用于小型电机的逆变器等应用进行了优化。它们采用各种标准封装, 与市场兼容, 并考虑到更高电压等级的要求:

- TO-247-4L
- TO-263-7L
- HV-CPAK

所有外壳均采用开尔文连接, 以优化开关性能, 并符合AEC-Q101认证要求。产品组合包括

- 1200V: 电阻范围为22至60mOhm
- 750V: 电阻范围为13mOhm至28mOhm

另一个分立元器件是分立型碳化硅器件Discrete SiC Line (DSL), 它专为更高的电流而设计, 并具有可焊接的功率端子。外壳的尺寸与市场兼容, 并针对逆变器应用进行了优化。

功率模块

博世的碳化硅MOSFET也有带散热器的B6功率模块, 提供多样性的选择, 灵活覆盖各种客户系统。所有模块设计符合AQG324。

Compact SiC Line (CSL)模块

CSL模块是PinFin散热器上的框架模块, 经过优化, 便于客户集成。它提供如下规格和可选项:

- 1200V: 275A和355A
- 750V: 420A和515A
- 可焊接功率端子用于低杂感DC-Link连接
- 尺寸紧凑, 158x84mm²
- 可选打螺钉功率端子
- 高可靠性: AMB烧结与芯片表面铜键合技术可提高鲁棒性

PM6.1模块

PM6.1是博世针对碳化硅器件提供的专有模块设计, 具有极高功率密度以及极为紧凑的模块布局, 其特点包括:

- 可焊接功率端子
- 可选PinFin散热器或者封闭式铝散热器
- 碳化硅双面烧结技术
- 采用双面陶瓷衬底的三明治结构, 可实现电流回路无键合功率路径, 同时保证高可靠性
- 模块内三维布局以确保高对称性和极低开关损耗

除了这些B6功率模块外, 博世还另提供DSL可用作逆变器应用的单个功率开关(参见分立元件), 并为系统扩展提供最大的灵活性。该产品组合包括750V和1200V功率等级。

EG120: SiC或IGBT功率晶体管的隔离栅极驱动器

EG12是一款适用于SiC或IGBT功率晶体管(最高电压1200V)的栅极驱动器IC。它专为汽车牵引逆变器而设计, 具有优化的栅极驱动控制, 可减少负载不平衡和开关损耗。它具有电气隔离、可调栅极电流、智能配置选择、健康监测和AEC-Q104认证等功能。

了解博世的碳化硅产品组合:

<https://www.bosch-semiconductors.com/products/sic-power-devices>.

合作项目——携手共进
[了解更多](#)



欧洲共同利益重要项目(IPCEI)–欧洲制造的半导体
[了解更多](#)



IPCEI ME/CT项目由德国联邦经济和气候行动部根据德国议会的决定提供支持, 由巴登-符腾堡州经济、劳工和旅游部根据巴登-符腾堡州议会的决定提供支持, 由萨克森自由州根据萨克森州议会通过的预算提供支持, 由巴伐利亚州经济、区域发展和能源部提供支持, 并由欧盟NextGenerationEU资助。

立即联系我们

博世销售办事处 >

全球特许经销商 >

 欲了解更多信息, 请访问或网站
www.bosch-semiconductors.com

 博世智能移动出行在LinkedIn上
www.linkedin.com/showcase/bosch-mobility

出版
罗伯特·博世有限公司
Robert-Bosch-Platz 1
70839 Gerlingen-Schillerhöhe
德国