

参考设计：3 相 400V 交流输入的 PFC 电路 使用 SiC MOSFET 提高电源效率

导言

如何解决环境和能源问题是一个重要的全球性议题。在电力需求增长的同时，节能需求以及对高效紧凑的电源转换系统的需求也在迅速增长。

例如，为减少导致气候变化的气体排放量，近年来在全球范围内采取了一系列举措以监管汽油车。这些举措在发达国家和中国及印度等新兴国家均已开始实施，并成为了全球趋势。电动汽车（EV）的采用是应对这一趋势的一大关键。但仍有一些问题需要解决，据称充电基础设施的发展最为关键。由于这是一个基础设施问题，国情、政策、资金、技术发展、标准化等的性质非常复杂。尤其是在新兴国家，鉴于其掌握的技术，预计在短期内开发出具有所需性能的高效电动汽车充电系统将是一项挑战。因此，工程团队亟需技术支持和开发资源，以使其能顺利、快速地从开发阶段过渡至商业化。

除了此示例，随着商业化和标准化进程的发展，将参考设计作为有效开发设计方法的案例数量也在增加，这在工业领域尤为明显。基于元器件制造商的相关和实际应用信息、功能广泛的参考设计现在正受到关注。

东芝电子元件及存储装置的参考设计

东芝电子元件及存储装置株式会社提供各种基于器件的参考设计，从而使系统开发和原型设计更为容易。可从网站的参考设计中心下载完整的参考设计。关于本文介绍的参考设计（URL 待定）以及相关信息的链接，请参阅页末的“相关信息”部分。请注意，参考设计附带使用条款，请一并参阅。

本文将介绍“3 相 400V 交流输入的 PFC 电源”参考设计，该参考设计可用于对电动汽车充电桩等大功率转换设备进行原型设计和开发。

●3 相 400V 交流输入的 PFC 电源（参考设计：RD044）

此参考设计为 3 相 400V 交流输入、4kW/750V 直流输出电源。通过安装一个功率因数校正（PFC）电路，可实现 97% 的功率转换效率和 0.99 以上的功率因数。这是交流线路部分和 PFC 部分（栅极驱动电路、传感器电路、输出电源开关）的参考设计。此参考设计具有以下特性：

(1) 3 相图腾柱无桥结构，可直接切换各相。

当配置 4kW 大功率 PFC 时（例如，此参考设计中的 PFC），一般的二极管桥式整流器和升压转换器配置会在二极管桥中造成较大的损耗，并在开关元件上产生较大的负载，因此经常使用多个元件并联的配置。然而，尽管这种配置可支持更高的功率，但转换效率不高，并且电源单元的规模会变大，因为并联电路需要与电路数相应的电感器等大型元器件，即至少两倍的量。此参考设计中使用的可直接切换各相的图腾柱结构解决了这些问题，因为其不需要二极管桥。

(2) 将 SiC MOSFET 用于电源开关，可实现高功率转换效率。

此参考设计是一个接收 3 相 400V 交流输入的 4kW PFC，因此图腾柱结构要求开关元件具有较高的耐压。由于此参考设计所需的元器件耐压为 1000V，因此通常选择 IGBT。但由于 IGBT 的结构和特性，其开关损耗高于 MOSFET，这限制了其实现高效率的能力。另一方面，SiC MOSFET 具有更快的开关速度，因此其开关损耗比 IGBT 低，并且可在更高的开关频率下运行。通常，开关损耗会随着开关频率的增加而增加，但使用 SiC MOSFET 可使总损耗低于 IGBT 的损耗。另外，由于能增加开关频率，因此可使用较小的电感器，以减小电源的尺寸。

(3) 可通过调整栅极驱动电路的开关速度，优化折衷效率和 EMI。

栅极驱动电路可调节 SiC MOSFET 导通和关断的开关速度，允许用户调整设备上的最终开关条件。用户可在监控最终操作环境中的 EMI 影响和开关浪涌的同时优化开关驱动条件。此参考设计中的栅极驱动 IC 光耦 TLP5214A，其灌电流和源电流为 4A，足以在开关期间驱动 1200V SiC MOSFET 的栅极充电和放电电流。TLP5214A 还具有过流保护（OVP）和欠压锁定（UVLO）功能，以在发生异常情况时发挥电路保护作用。

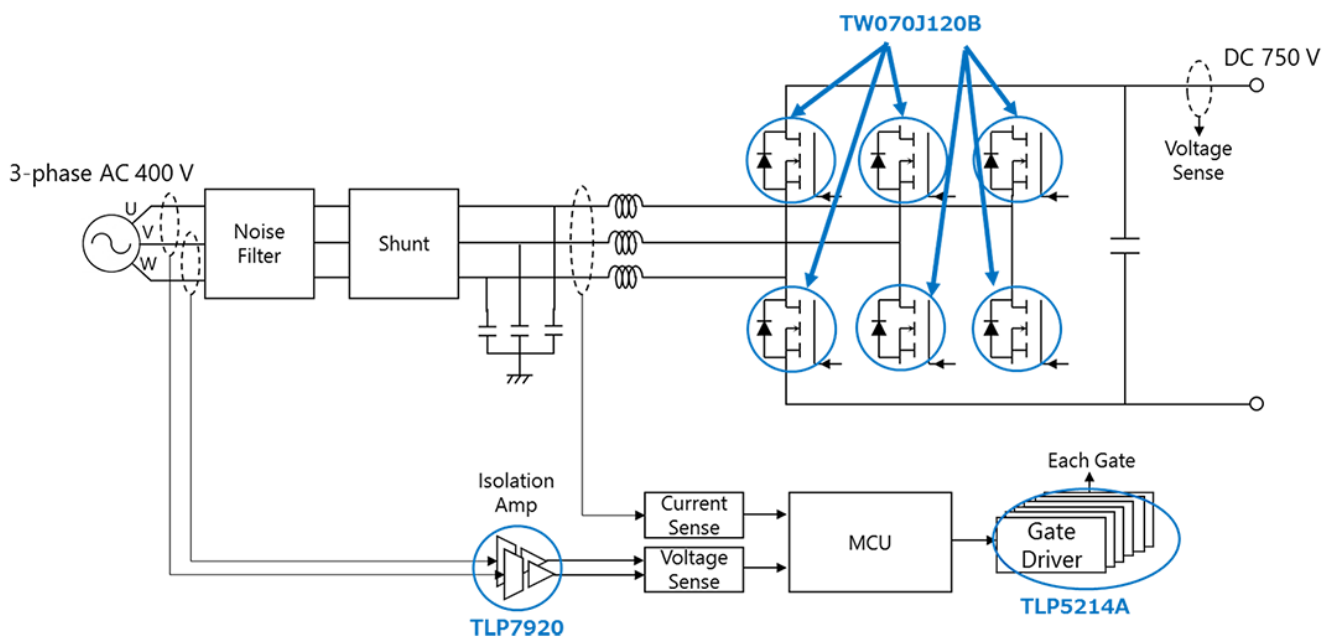


图 1：3 相 400V 交流输入的 PFC 电源参考设计的功能方框图

主要规格如下：

- 交流输入电压额定值：3 相 400V AC（312V AC 至 528V AC）
- 交流频率：50Hz $\pm$ 0.2Hz，60Hz $\pm$ 0.3Hz
- 最大交流输入额定电流 6.2A RMS
- 输出电压额定值：750V DC $\pm$ 1%
- 输出功率额定值：4.0kW
- 开关频率：50kHz
- 功率转换效率：97%（400V AC 输入、4.0kW 输出时）

- 控制方式：功率因数 1 控制，直流电压控制，功率因数 0.99 或以上
- 介电强度：2500V（主电路-控制电路）

使用 SiC MOSFET 作为开关元件可实现此参考电路的高转换效率，它拥有比 IGBT 更快的开关特性。SiC 功率器件在功率转换电路领域具有巨大的潜力，广泛用于相关应用。

双向充电应用示例

这是使用此参考设计的一个应用示例。该系统使用高效 PFC 电源将 3 相 400V 交流转换为直流，并将其与双向 DC-DC 转换器组合，从而实现双向充电。

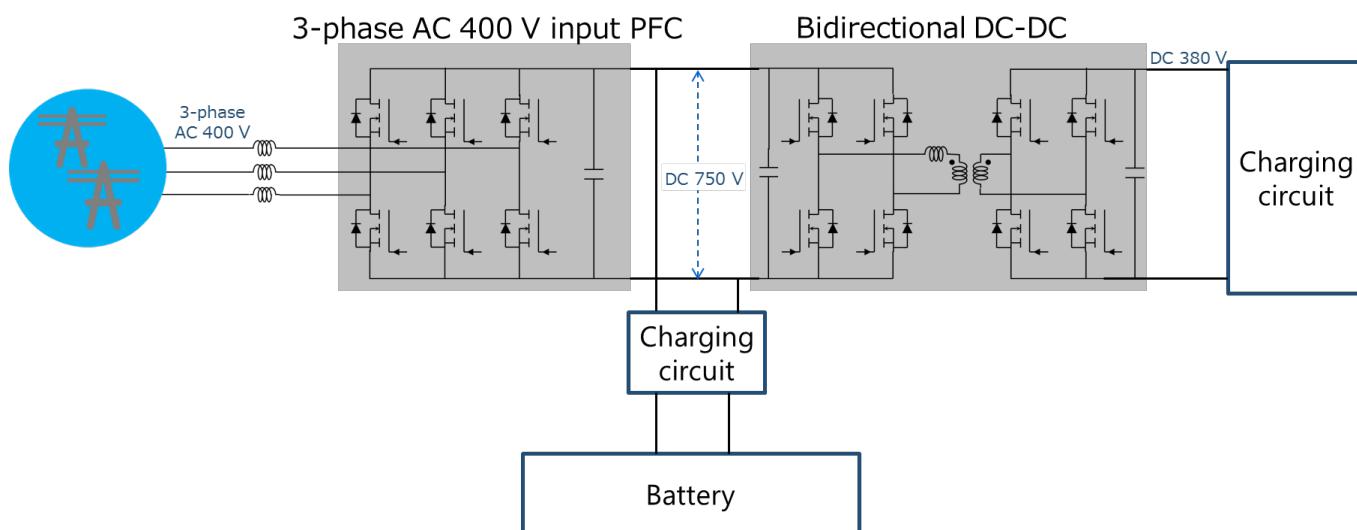


图 2：采用 3 相 400V 交流输入的 PFC 电源参考设计的电动汽车充电系统图

目前，东芝正为双向 DC-DC 准备参考设计。结合使用参考设计，可快速轻松地进行系统开发。

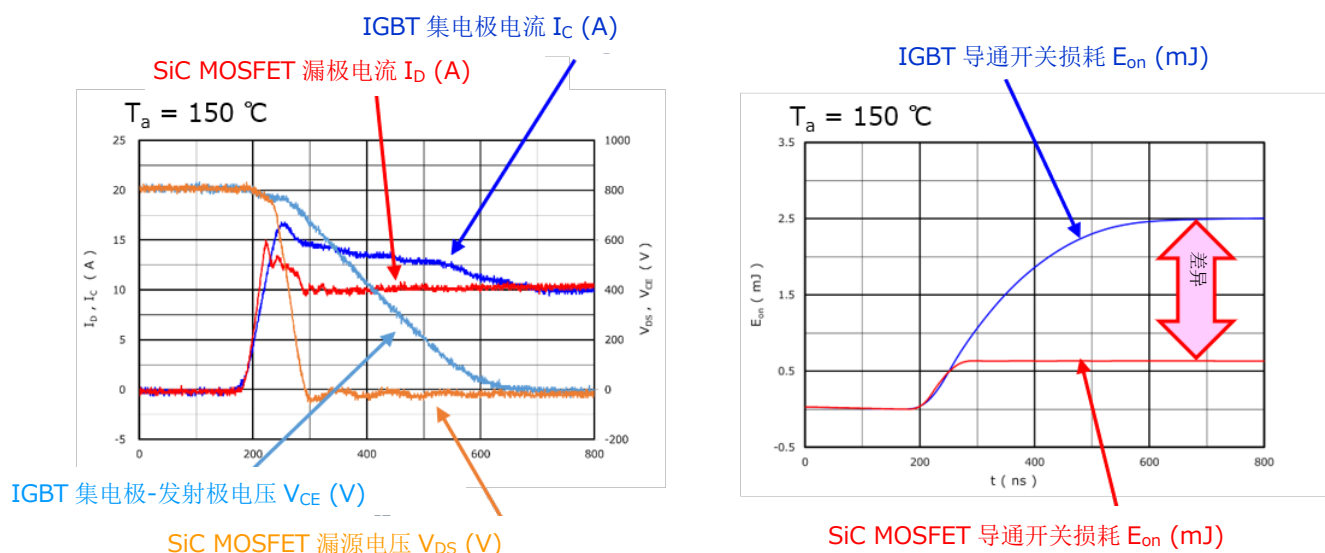
SiC MOSFET 的特性

功率器件的性能极大地影响了电源转换系统的效率（即减少损耗）。因此，除了常规的 Si（硅）之外，也越来越多地使用 SiC（碳化硅）和 GaN（氮化镓）等宽带隙半导体材料的功率器件。

在上文重点介绍的参考设计中，采用所示 SiC MOSFET 可提高转换效率。下文将介绍绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和 SiC MOSFET 的损耗比较示例。

● SiC MOSFET 与 IGBT 的损耗比较

开关晶体管的损耗为开关损耗、由于导通电阻导致的导通损耗以及内部二极管的正向电压损耗之和。其中，开关损耗占总损耗的近 90%。图 3 为 SiC MOSFET 和 IGBT 导通期间的开关波形及损耗 E_{on} 的一个比较示例。用于比较的 SiC MOSFET 是此参考电路中使用的东芝的 [TW070J120B](#)，而 IGBT 则为另一家公司生产的高速开关类产品。



- SiC MOSFET 测试条件

$V_{DD}=800\text{V}$, $I_D=10\text{A}$, $T_a=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{GS}=20\text{V}/-5\text{V}$, 介电负载: $L=1\text{mH}$, 外部栅极电阻 $R_G=150\text{ }\Omega$

源漏二极管与感性负载并联用作续流二极管 (FWD)

- IGBT 测试条件

$V_{CC}=800\text{V}$, $I_C=10\text{A}$, $T_a=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{GE}=20\text{V}/-5\text{V}$, 介电负载: $L=1\text{mH}$, 外部栅极电阻 $R_G=47\text{ }\Omega$

发射极-集电极二极管与感性负载并联用作续流二极管 (FWD)

* 测试条件设为与导通时 I_D 和 I_C 的倾斜度 $dI_D(I_C)/dt$ 相匹配

图 3: SiC MOSFET 和 IGBT 导通时开关波形和损耗 E_{on} 的比较示例

此示例显示 IGBT 的导通损耗为 2.5mJ, SiC MOSFET 的导通损耗为 0.6mJ, 因此当用 SiC MOSFET 开关晶体管代替 IGBT 开关晶体管时, 导通损耗可降低 76%。这种损耗差异主要是由于开关波形图中 V_{DS} 和 V_{CE} 之间的开关特性 (速度) 差异。SiC MOSFET 几乎立即完全导通, I_D 相应流动, 而 IGBT 需要一定时间才能完全导通, 而延迟是造成损耗的原因。

同样, 图 4 是导通和关断开关损耗、导通电阻引起的导通损耗以及内部二极管 SiC MOSFET 和 IGBT 的正向电压引起的损耗之和的一个模拟比较示例。具体条件包括 $V_{CC}=400\text{V}$ 、 $I_D=7.0\text{Arms}$ 、功率因数=1、3 相调制、 $T_j=150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据该结果可知, 与 IGBT 相比, SiC MOSFET 可减少约 28W 的损耗, 这有助于提高设备的效率。

这样，即使在现有的通用功率转换应用中，也可用 SiC MOSFET 代替 IGBT 以显著减少损耗。在输送电力相同的情况下，通过减少损耗可减小电路尺寸。同样，如果其大小相同，则可输送更多电力。

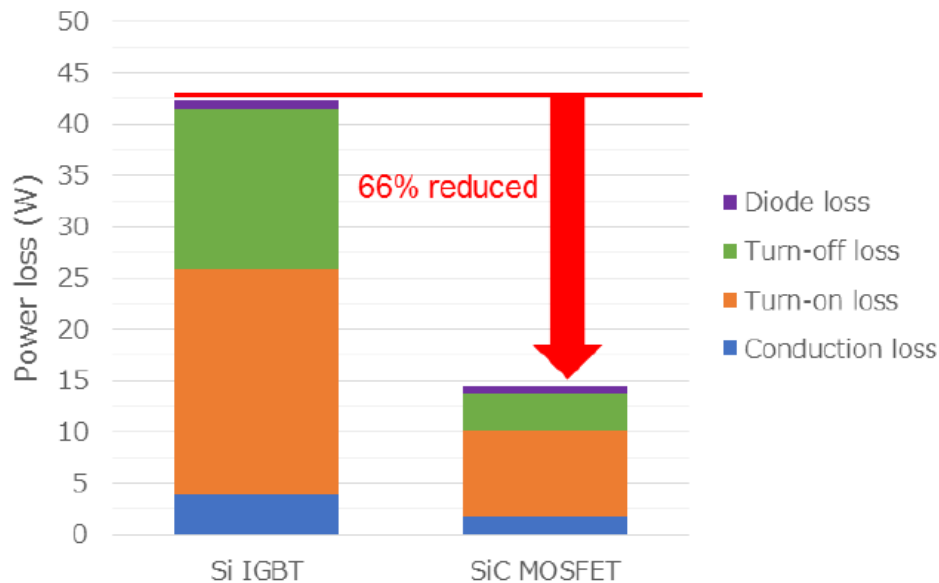
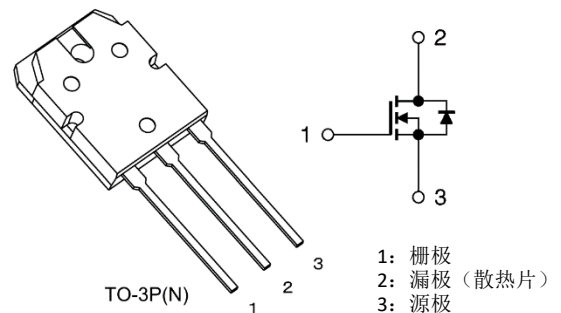


图 4: SiC MOSFET 和 IGBT 损耗的比较示例

• SiC MOSFET: [TW070J120B](#)

此参考电路使用的 TW070J120B 是具有内置 SiC 肖特基势垒二极管 (SiC SBD) 的一个 N 沟道 SiC MOSFET，使用东芝的第二代芯片设计而成。主要规格如下：

- 内置 SiC 肖特基势垒二极管
- 内置二极管低正向电压: $V_{DSF} = -1.35V$ (典型值)
- 高耐压: $V_{DSS} = 1200V$
- 宽栅极-源极电压: $V_{GSS} = +25V$ 至 $-10V$
- 低导通电阻: $R_{DS(ON)} = 70m\Omega$ (典型值)
- 高栅极阈值: $V_{th} = 4.2V-5.8V$



内置的 SiC 肖特基势垒二极管相较于 MOSFET 体 (寄生) 二极管实现了更低的 V_{DSF} ，并降低了二极管的导通损耗。另外，由于采用具有高 I_{FSM} 的二极管，因此具有优异的浪涌电流耐受能力。从可靠性角度看，内置二极管只需要一个元器件，从而可减少组成电路的故障率。

栅极-源极电压额定值 V_{GSS} 相较于竞争产品范围更大。 V_{GSS} 的宽容差使设计更容易。

此外，标准栅极阈值电压高于竞争产品。因此发生栅极电压和噪声波动导致误动作的可能性降低。

TW070J120B 是一种易于设计的 SiC MOSFET，具有这些特性，因此具有低损耗和稳健性。

• SiC MOSFET 的栅极驱动

SiC MOSFET 的栅极驱动是一种考虑 SiC 的物理特性和高速开关特性的方法。以 TW070J120B 为例，要点总结如下。有关详细信息，请参考相关应用指南。

<SiC MOSFET 栅极控制的要点>

- (1) 严格遵守栅极-源极电压的-10V 至 25V 的绝对最大额定值。
- (2) 将导通时的栅极电压设为 18V 至 20V。
- (3) 将关断时的栅极电压设为 0 至-5V。
- (4) 需用栅极电荷对栅极-源极电容 (C_{GS}) 全充电。

为施加栅极电压并将其导通，必须用栅极电荷对栅极-源极电容进行充电。当 V_{GS} 为 0 至 20V 时，标准栅极电荷为 70nC ($V_{DD}=800V$ 、 $V_{GS}=20V$ 、 $I_D=36A$)。必须在所使用的开关频率下载流，以充分充电。

设计工程师还应注意，在先前推出的参考设计中，为栅极驱动电路设置了标准条件。可通过检查和评估实际操作来实现优化。

总结

近年来，缩短产品上市时间的需求日益迫切，参与设备开发和设计的工程师必须使其在尽可能短的时间内投产。对于客户的设计和原型制作，供应商的参考设计至关重要。

本文介绍的“用于 3 相 400V 交流输入的 PFC 电源”的参考设计旨在提高功率转换应用的效率和小型化，减少损耗以提高效率的关键是将功率开关从传统的 IGBT 替换为 SiC MOSFET。众所周知，SiC 功率器件在大功率应用领域具有优势，但为利用其优异的性能，则必须了解 SiC 功率器件的特性。为此，参考设计提供了标准条件，有助于顺利、快速地完成开发设计。

从应用角度看，电动汽车的普及是全球范围内的一项迫切需求，以减少导致气候变化的气体排放量。开发团队可将此参考设计用于基础设施设计，例如电动汽车充电桩。这类参考设计对于新兴国家的发展尤为有益。

东芝公司计划在未来增加其参考设计的数量，从而加快开发含有用于大功率转换应用的 SiC 功率器件的设计。同时，东芝正在开发新一代 SiC 功率器件。除了目前的第二代产品，东芝计划在不久的将来推出第三代产品。

信息链接

- [用于 3 相 400V 交流输入的 PFC 电路（参考设计 RD044）](#)
- [参考设计中心](#)
- [SiC MOSFET 产品页面](#)
- [SiC MOSFET: TW070J120B](#)

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation

<https://toshiba.semicon-storage.com/ad/contact.html>



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

Toshiba Corporation and its subsidiaries and affiliates are collectively referred to as “TOSHIBA”.

Hardware, software and systems described in this document are collectively referred to as “Product”.

- TOSHIBA reserves the right to make changes to the information in this document and related Product without notice.
- This document and any information herein may not be reproduced without prior written permission from TOSHIBA. Even with TOSHIBA's written permission, reproduction is permissible only if reproduction is without alteration/omission.
- Though TOSHIBA works continually to improve Product's quality and reliability, Product can malfunction or fail. Customers are responsible for complying with safety standards and for providing adequate designs and safeguards for their hardware, software and systems which minimize risk and avoid situations in which a malfunction or failure of Product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property, including data loss or corruption. Before customers use the Product, create designs including the Product, or incorporate the Product into their own applications, customers must also refer to and comply with (a) the latest versions of all relevant TOSHIBA information, including without limitation, this document, the specifications, the data sheets and application notes for Product and the precautions and conditions set forth in the "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" and (b) the instructions for the application with which the Product will be used with or for. Customers are solely responsible for all aspects of their own product design or applications, including but not limited to (a) determining the appropriateness of the use of this Product in such design or applications; (b) evaluating and determining the applicability of any information contained in this document, or in charts, diagrams, programs, algorithms, sample application circuits, or any other referenced documents; and (c) validating all operating parameters for such designs and applications. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR CUSTOMERS' PRODUCT DESIGN OR APPLICATIONS.**
- **PRODUCT IS NEITHER INTENDED NOR WARRANTED FOR USE IN EQUIPMENTS OR SYSTEMS THAT REQUIRE EXTRAORDINARILY HIGH LEVELS OF QUALITY AND/OR RELIABILITY, AND/OR A MALFUNCTION OR FAILURE OF WHICH MAY CAUSE LOSS OF HUMAN LIFE, BODILY INJURY, SERIOUS PROPERTY DAMAGE AND/OR SERIOUS PUBLIC IMPACT ("UNINTENDED USE").** Except for specific applications as expressly stated in this document, Unintended Use includes, without limitation, equipment used in nuclear facilities, equipment used in the aerospace industry, lifesaving and/or life supporting medical equipment, equipment used for automobiles, trains, ships and other transportation, traffic signaling equipment, equipment used to control combustions or explosions, safety devices, elevators and escalators, and devices related to power plant. **IF YOU USE PRODUCT FOR UNINTENDED USE, TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR PRODUCT.** For details, please contact your TOSHIBA sales representative or contact us via our website.
- Do not disassemble, analyze, reverse-engineer, alter, modify, translate or copy Product, whether in whole or in part.
- Product shall not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable laws or regulations.

- The information contained herein is presented only as guidance for Product use. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringement of patents or any other intellectual property rights of third parties that may result from the use of Product. No license to any intellectual property right is granted by this document, whether express or implied, by estoppel or otherwise.
- **ABSENT A WRITTEN SIGNED AGREEMENT, EXCEPT AS PROVIDED IN THE RELEVANT TERMS AND CONDITIONS OF SALE FOR PRODUCT, AND TO THE MAXIMUM EXTENT ALLOWABLE BY LAW, TOSHIBA (1) ASSUMES NO LIABILITY WHATSOEVER, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, SPECIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES OR LOSS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOSS OF PROFITS, LOSS OF OPPORTUNITIES, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, AND (2) DISCLAIMS ANY AND ALL EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS RELATED TO SALE, USE OF PRODUCT, OR INFORMATION, INCLUDING WARRANTIES OR CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ACCURACY OF INFORMATION, OR NONINFRINGEMENT.**
- Product may include products using GaAs (Gallium Arsenide). GaAs is harmful to humans if consumed or absorbed, whether in the form of dust or vapor. Handle with care and do not break, cut, crush, grind, dissolve chemically or otherwise expose GaAs in Product.
- Do not use or otherwise make available Product or related software or technology for any military purposes, including without limitation, for the design, development, use, stockpiling or manufacturing of nuclear, chemical, or biological weapons or missile technology products (mass destruction weapons). Product and related software and technology may be controlled under the applicable export laws and regulations including, without limitation, the Japanese Foreign Exchange and Foreign Trade Law and the U.S. Export Administration Regulations. Export and re-export of Product or related software or technology are strictly prohibited except in compliance with all applicable export laws and regulations.
- Product is subject to foreign exchange and foreign trade control laws.
- Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. Please use Product in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. **TOSHIBA assumes no liability for damages or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.**

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation