

## SiC MOSFET

# 使用第 4 代 SiC MOSFET 的 5kW 逆变电路

在应用笔记本《5kW 高效率无风扇逆变电路》(64AN084J Rev.001) (\*1) 中,介绍了使用第 3 代 SiC MOSFET 的高效率逆变电路。本文针对将开关器件置换成第 4 代 SiC MOSFET 后其性能的改善效果进行说明。

本次评估由罗姆与 Power assist technology 公司 (<https://www.power-assist-tech.co.jp/>) 共同实施。

## 在全桥逆变电路中的置换评估

本次评估采用全桥逆变电路,其平台的外观如图1所示,基本电路结构如图2所示。



图 1. 评估平台

为了输出5kW,单桥臂并联2个开关器件,使用的开关器件数共计8个。本次,我们测量并对比了使用8个第3代SiC MOSFET与使用8个第4代SiC MOSFET的逆变器的效率。

另外,该设计原本是以IGBT为基础的(\*1),振荡频率设定为20kHz,使用的电感器变大。由于本次对比的对象都是SiC MOSFET,所以将频率设定为40kHz,以便更清晰地看出器件间的性能差异。

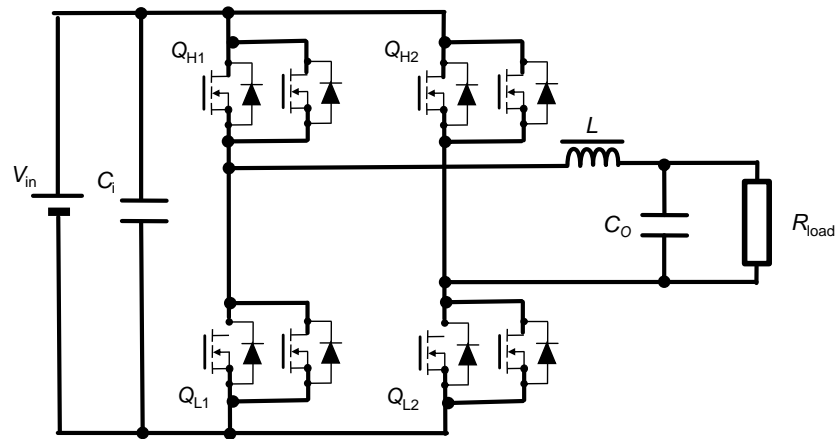


图2 电路结构图

## 效率评估

在应用笔记本《5kW 高效率无风扇逆变电路》(\*1)中,对第3代SiC MOSFET与IGBT的输入输出转换效率进行了对比。而本次则在全桥逆变电路中,在完全相同的条件下,对第3代SiC MOSFET和第4代SiC MOSFET转换效率进行了对比测量。

表1为评估条件和电路常数。

表1 评估条件和使用部件

Items	第3代	第4代
Switching Devices	650V, 30mΩ (SCT3030AL)	750V, 26mΩ (SCT4026DE)
Input voltage ( $V_{in}$ )	DC 320 V	
Input capacitance ( $C_i$ )	560 $\mu$ F $\times$ 4	
Switching frequency ( $f_{sw}$ )	40kHz	
Leakage / Smoothing inductance ( $L$ )	300 $\mu$ H $\times$ 4 (BCH61-35150)	
Copper wire resistance of the reactor	20 mΩ $\times$ 4	
Output capacitance ( $C_o$ )	1 $\mu$ F $\times$ 8	
Output voltage ( $V_{out}$ )	AC 200 V	

图3是以输出功率 $P_{out}$ 为横轴的逆变器的效率。效率 $\eta$ 为输入功率 $P_{in}$ 与 $P_{out}$ 之比，即 $P_{out}/P_{in}$ 。但总功耗( $P_{total} = P_{in} - P_{out}$ )中不包括MOSFET的栅极驱动损耗。

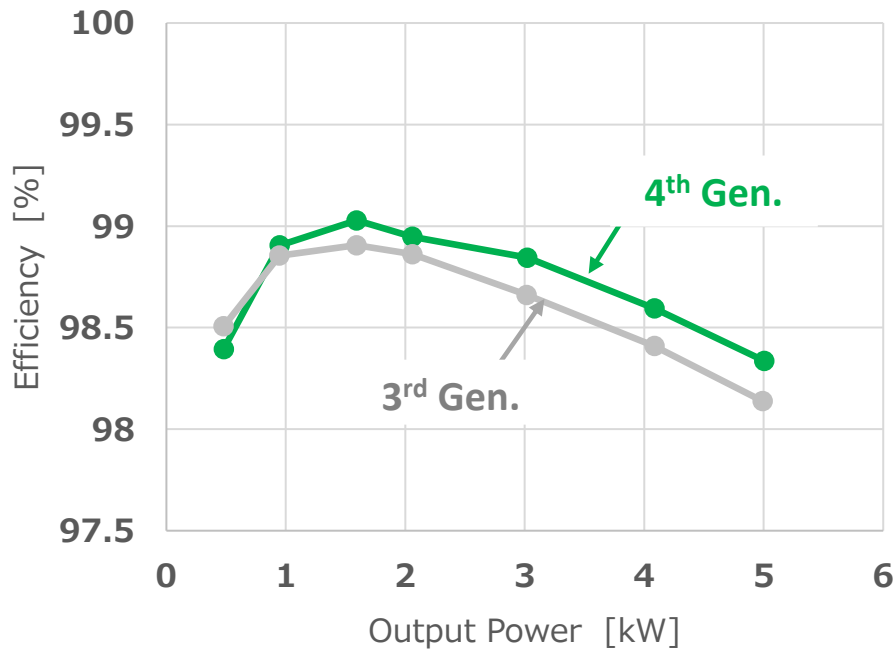


图3 以 $P_{out}$ 为指标的效率

使用第4代SiC MOSFET时，效率几乎在全负载范围内得到了改善，5kW时的损失为10.13W，与第3代SiC MOSFET相比有所减少。且通过降低损耗，效率提高了0.20%。另外，最高效率也从98.91%提高至99.03%，提高了0.12%，实现了高于99%的效率。接下来将详细分析损耗。

### 损耗分析

图4的饼状图显示了 $P_{out}=5kW$ 时逆变器的总功耗 ( $P_{total}$ ) 的详情。(a) 为使用第3代SiC MOSFET时的情况，(b) 为使用第4代SiC MOSFET时的情况。损耗包括MOSFET的导通损耗和开关损耗、上下臂死区期间的体二极管的导通损耗、电感器的铜损和磁芯损耗、输入输出电容器的ESR损耗等。

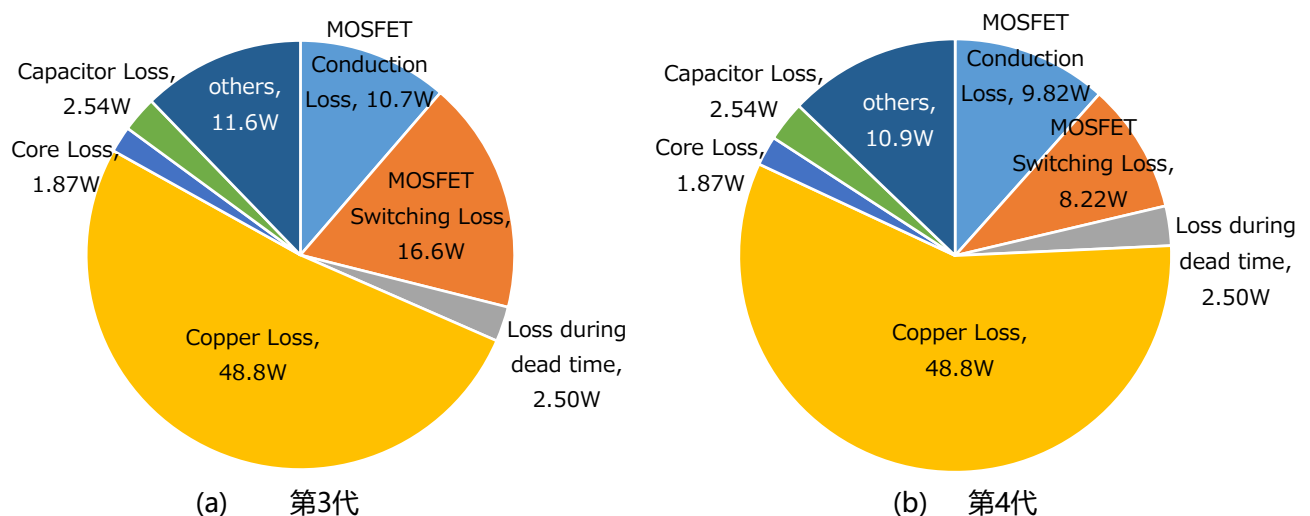


图4 5kW时的 $P_{total}$ 分析

MOSFET的特性随温度而变化。而在本次损耗分析中，由于拥有冷却风扇带来的充分的冷却条件，温度上升50°C左右，因此基于温度上升50°C时的导通电阻 ( $R_{ON}$ ) 进行计算。接下来进行详细说明。

### 1) MOSFET的导通损耗:

第4代SiC MOSFET的 $R_{DS(ON)}$ ，在温度上升50°C时约为32mΩ，流经1个MOSFET的有效电流为12.5 Arms。上臂MOSFET ( $Q_{H1}$ 和 $Q_{H2}$ ) 和下臂MOSFET ( $Q_{L1}$ 和 $Q_{L2}$ ) 在同步整流模式下动作，上臂或下臂MOSFET除了220ns的死区 (DT) 之外，保持其中一者处于导通的状态。MOSFET的一个周期为25μs，因此PWM部分的MOSFET的导通损耗为  $(12.5Arms)^2 \cdot 32m\Omega \cdot (1 - (220ns \cdot 2) / 25\mu s) \cdot 2pcs = 9.82W$ 。

按照同样的方法计算第3代SiC MOSFET，由于 $R_{DS(ON)}$  约为35mΩ，因此导通损耗为10.7W。

### 2) MOSFET的开关损耗:

图5和图6显示了PWM部分使用的第4代SiC MOSFET (SCT4026DE) 的 $R_G$ - $E_{SW}$ 、 $R_G$ - $d_v/d_t$ 、 $R_G$ - $d_i/d_t$ 特性。图5的横轴为漏极电流 $I_D$ ，图6的横轴为外置栅极电阻 $R_G$ 。这些特性是用双脉冲测试测得的。

$R_G$ 越小，开关速度越快， $E_{SW}$ 越小， $d_v/d_t$ 和 $d_i/d_t$ 越大。此次应用TO-247N封装器件进行评估，如果 $d_i/d_t$ 变大的话，源极端的寄生电感引起的电动势就会变大。 $R_G$ 在4.7Ω以下时，开关损耗几乎没有变化。因此，本次使用 $R_G$ 为4.7Ω时的 $E_{on}$ 、 $E_{off}$ 计算总开关损耗。

MOSFET的开关损耗能量 ( $E_{SW}$ ) 主要由开通损耗能量 ( $E_{on}$ )、关断损耗能量 ( $E_{off}$ ) 以及反向恢复损耗能量 ( $E_{rr}$ ) 构成。

相位角 $\theta$ 处流经1个MOSFET的平均电流用公式 (1) 表示，因此PWM部分的MOSFET的平均 $P_{sw}$ 为整个期间的 $E_{total\_sw} \cdot f_{sw}$ 的积分值，该积分可以通过平均化公式 (2) 求出。

$$I = \sqrt{2} \cdot 12.5 \cdot \sin \theta \quad (A) \quad (1)$$

$$P_{SW} = \frac{1}{T} \int_0^T E_{total\_sw} f_{sw} dt \cdot 4pcs = 8.22 W \quad (2)$$

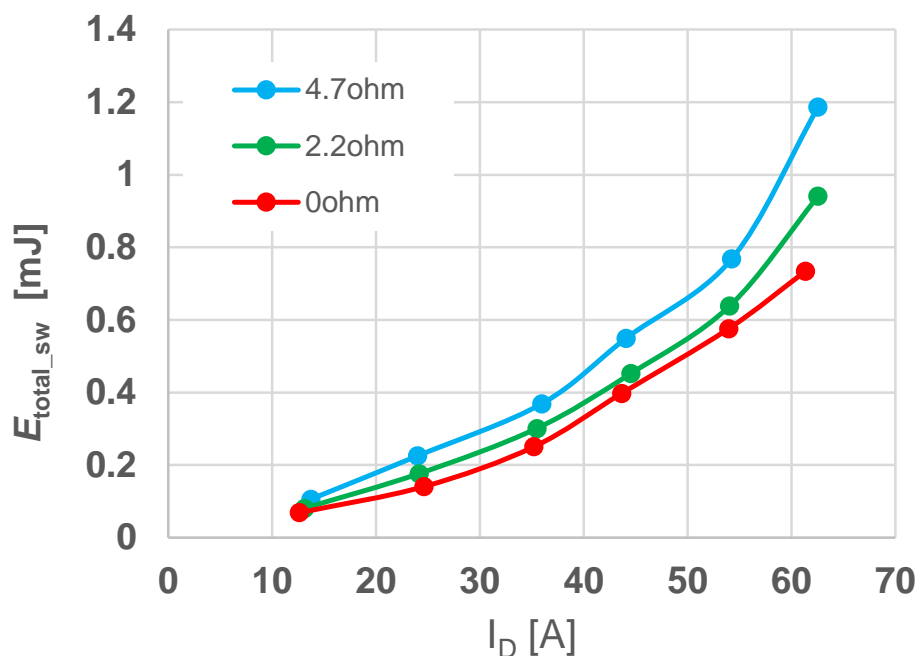
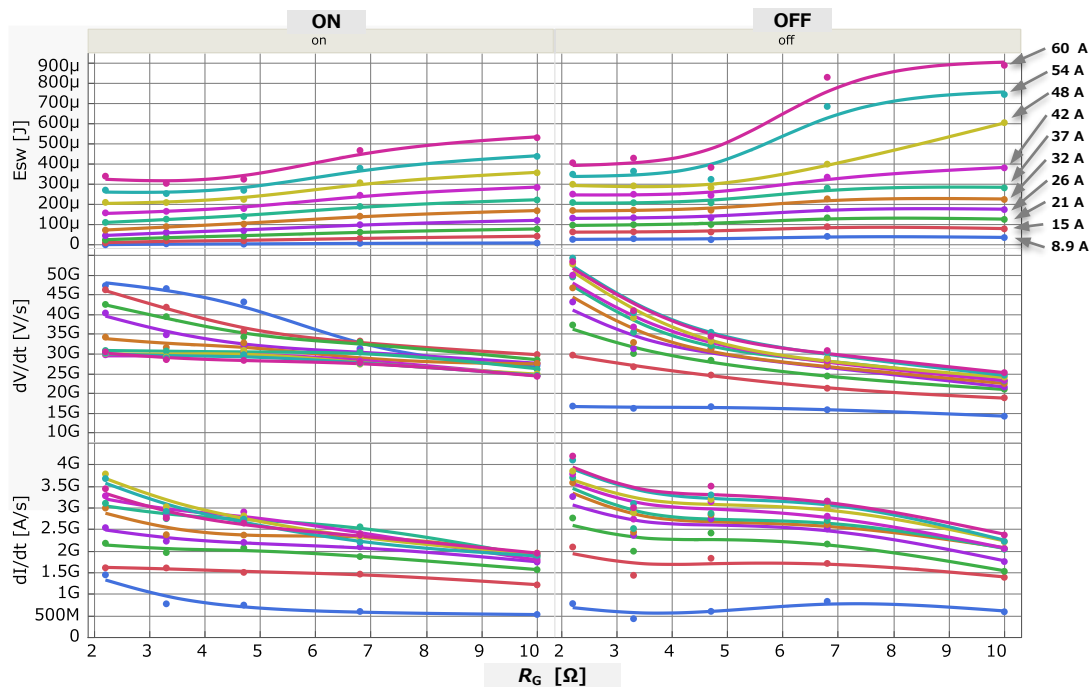


图5 以 $I_D$ 为横轴的SCT4026DE开关特性

图6 以 $R_G$ 为横轴的SCT4026DE开关特性

### 3)死区时间的功率损耗:

此次逆变器将死区时间设定为220ns, 在此期间, 电流会流向MOSFET的体二极管。流经体二极管的平均电流也可以用公式(1)表示。与 $P_{sw}$ 一样, 死区时间的功耗 $P_{DT}$ 通过以下公式计算求出。

$$P_{DT} = \frac{1}{T} \int_0^T |V_{DS}| \cdot |I_D| \cdot f_{sw} \cdot 2DT dt \cdot 2pcs. \quad (3)$$

$V_{DS}$ 和 $I_D$ 分别是MOSFET的源极-漏极间电压和电流。根据MOSFET的第3象限V-I特性计算 $P_{DT}=1.25W \cdot 2pcs=2.50W$ 。

### 4)铜损:

电感器为4串联结构, 由于工作频率为20kHz, 一个电感器的励磁电感设计为300μH以上, 绕组匝数为40圈以上。因此, 一个电感器的绕组的铜线电阻值为19.53mΩ, 有效电流25Arms的总铜损为 $(25Arms)^2 \cdot 19.53m\Omega = 12.21W$ 。由于是4串联, 因此为 $12.21W \cdot 4 = 48.83W$ 。这基本上与载波频率无关。

### 5)磁芯损耗:

电感器磁芯损耗可以从公式(4)中得出的电感器的纹波电流 $\Delta i_L$ 的最大值求出。电感器具有一定的直流叠加特性, 随电流值和占空比d而变化, d为0.5时为最大值,  $\Delta i_L=2.58A$ 。

$$\Delta i_L = \frac{d(1-d)V_{in}T}{L} \quad (4)$$

根据所使用的芯材(铁镍高磁通磁芯)的磁芯损耗特性, 估算磁芯损耗为1.87W。

### 6)电容器的等效串联电阻(ESR)损耗:

流经输入输出电容器的纹波电流会因电容器的等效串联电阻(ESR)而产生损耗。输出电容器的纹波电流与电感器的 $\Delta i_L$ 相同。另一方面, 输入电容器的纹波电流 $i_{cin}$ 可以用公式(5)计算。

$$i_{Cin} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} i_{OUT}^2 \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}}\right) + \frac{1}{12} \Delta i_L^2} \quad (5)$$

根据公式计算，输入输出电容器的损耗为2.54W，但基本上都是输入电容器的损耗。

### 5)其他:

上述以外的剩余功耗包括电路板的配线部件的导通损耗等，第3代约为11.6W，第4代约为10.9W。第4代减少了约0.7W，可以认为损耗减少的主要原因之一是开关速度高速化带来的MOSFET驱动损耗的降低。

5kW逆变器的损耗明细对比如图7所示。晶体管的损耗对实际整体损耗有着很大的影响，即使将开关频率提高2倍以上，但只要将Si IGBT替换为第3代SiC MOSFET，损耗就会降低37W（28%），替换成第4代SiC MOSFET后损耗则进一步降低10W（11%）。从第3代和第4代的对比可知，开关损耗的降低也就是整体损耗的降低。

表2总结了使用了各开关器件的逆变电路的性能。由于本次在同一平台上进行了评估，所以无法对比尺寸上的优点，但即使是在高频下，第4代SiC MOSFET也实现了36%的损耗降低，因此可以实现大幅度的性能改善，如散热结构的简化和电感器的小型化等。

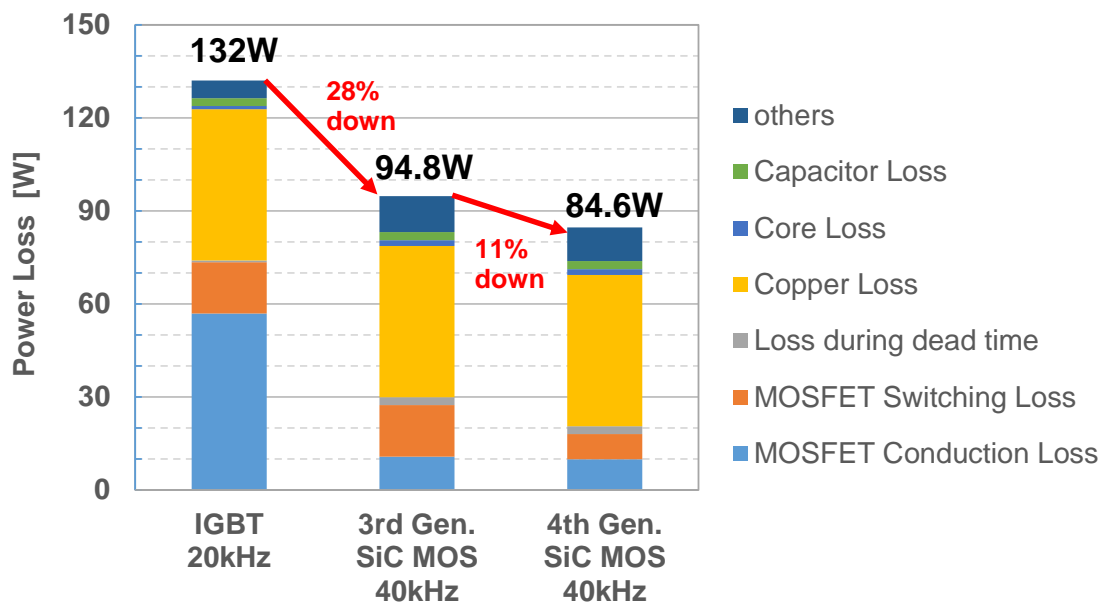


图7 5kW时各逆变器 $P_{total}$  明细对比

表2 各逆变电路性能对比

	IGBT	第3代 SiC MOSFET	第4代 SiC MOSFET
Switching transistors	STGW60H65DFB 650V, 60A	SCT3030AL 650V, 30mΩ	SCT4026DE 750V, 26mΩ
Switching frequency	20 kHz	40 kHz	40 kHz
Conversion efficiency (@5 kW)	97.43%	98.14%	98.33%
Total loss (@5 kW)	132 W	94.8 W	84.6 W

## 总结

与Si IGBT相比，在全桥式逆变电路中使用SiC MOSFET作为开关器件，即使开关频率更高，也能大幅提高转换效率。并且，通过将第3代SiC MOSFET替换为第4代的SiC MOSFET，大幅改善了开关特性，实现了进一步的效率提高。

第4代SiC MOSFET有望为所有电源系统的小型化和节能化做出巨大贡献。

## 参考资料:

\*1. 5 kW High-Efficiency Fan-less Inverter

Application Note (No. 64AN084JRev.001), ROHM Co., Ltd. September 2021

## Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- 2) Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications :
- 3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors.  
Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Products beyond the rating specified by ROHM.
- 4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.
- 5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.
- 6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.
- 7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative : transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.
- 8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.
- 9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.
- 10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.
- 11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.
- 12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.
- 13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.



Thank you for your accessing to ROHM product informations.  
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

## ROHM Customer Support System

<https://www.rohm.com.cn/contactus>