



成功实现功率器件热设计的4大步骤

概要

铁路、汽车、基础设施、家电等电力电子一直在与我们息息相关的生活中支持着我们。为节省能源和降低含碳量（实现脱碳），需要高度高效的电力电子技术。IGBT、SiC、GaN 等次时代功率器件的存在是实现这一目标的重要一环，但一旦使用不当则会导致意想不到的不良或降低可靠性，严重时可能会因为市场不良导致召回。其中尤为重要的是直接影响可靠性的热设计。一旦发生问题，则可能会需要重新进行器件选型，修改基板布局，重新进行散热设计等，从而导致返工工时以及成本的增加。为此，罗姆准备了一系列的应用笔记，汇总了与热设计相关的信息，将有助于提高设备可靠性，减少设计返工。本白皮书将介绍其中的部分应用笔记。

应用笔记的介绍

图 1 展示了罗姆可针对客户的开发流程提供的工具及支持。

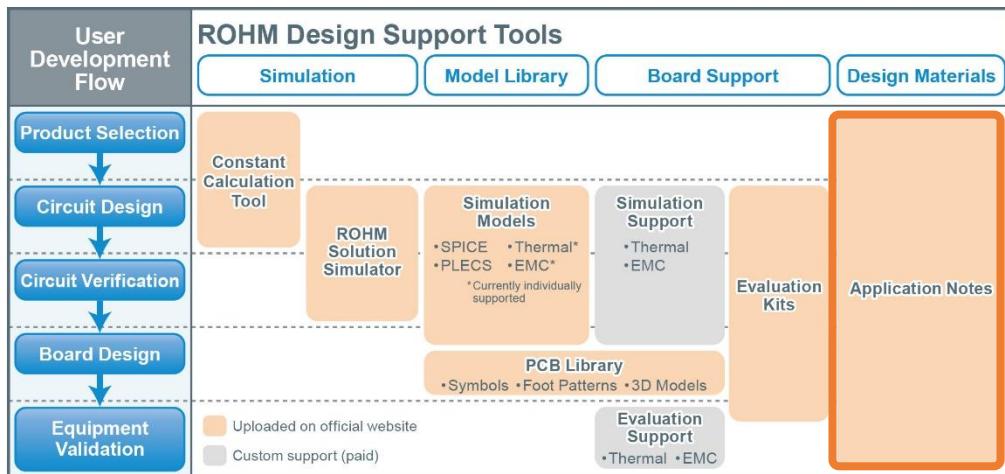


图 1. 罗姆可提供的支持设计和验证的工具

应用笔记是汇总了用户开发流程各阶段所需的技术信息的文档，从基础到实践性内容全方位支持客户。在此，将分 4 大步骤介绍为成功进行热设计所准备的应用笔记。

步骤 1 学习热设计的基础

步骤 2 了解所使用元器件的热特性

步骤 3 活用热仿真

步骤 4 正确进行热测量

步骤 1 学习热设计的基础

首先我们有必要了解热设计的基础。即使导入了昂贵的系统（测定仪器或仿真软件），如果不了解热设计的基础，就无法有效地进行使用，从而无法成功地进行热设计。那么请首先通过《何谓热设计》来确认热设计的重要性（图 2）。

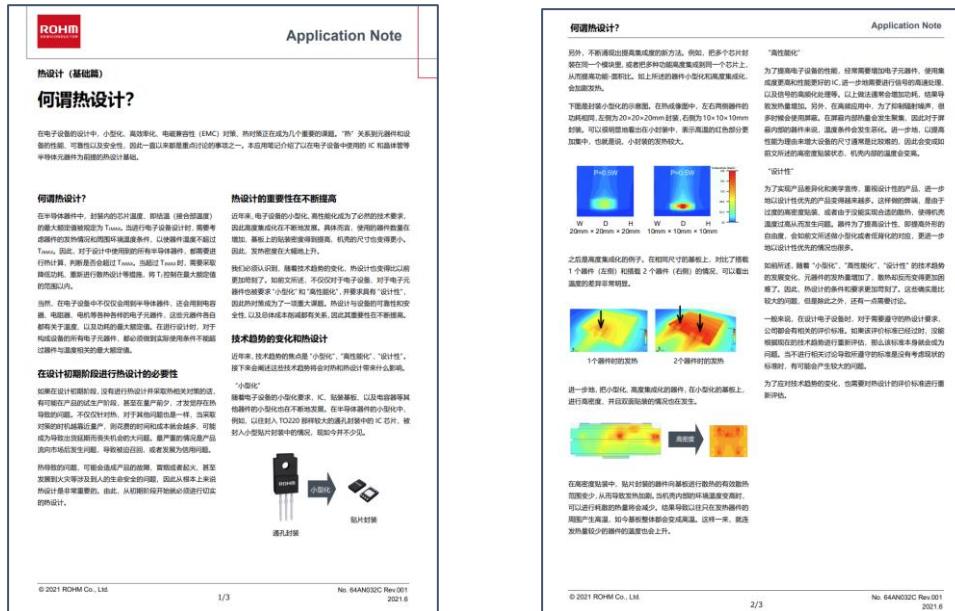


图 2. 何谓热设计 (摘录)

进行热设计时最重要的参数是各器件的“热阻”。通过利用热阻可以简单地理解复杂的传热现象，是成功实现热设计的捷径（《热阻和散热的基础》图 3）。

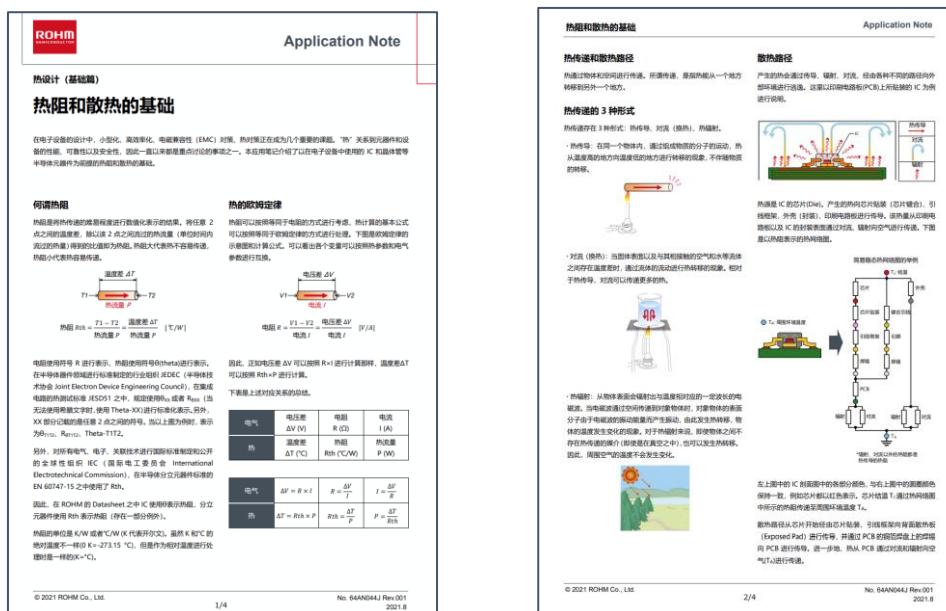


图 3. 热阻和散热的基础 (摘录)

步骤 2 了解所使用元器件的热特性

为实现所开发设备的规格，半导体用户有必要了解所使用功率器件的特性。具体来说，即“结温的绝对最大额定值”和“热阻”、“发热量（功耗）”。结温的绝对最大额定值因器件不同而不同，但规格书中一定会记载相关信息。例如，SiC MOSFET 的结温 175°C 是绝对最大额定值（图 4）。

●Absolute maximum ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Drain - Source Voltage	V_{DSS}	650	V
Continuous Drain current $T_c = 25^\circ\text{C}$	I_D^{*1}	70	A
	I_D^{*1}	50	A
Pulsed Drain current	$I_{D,pulse}^{*2}$	175	A
Gate - Source voltage (DC)	V_{GSS}	-4 to +22	V
Gate - Source surge voltage ($t_{surge} < 300\text{ns}$)	$V_{GSS_surge}^{*3}$	-4 to +26	V
Recommended drive voltage	$V_{GS_on}^{*4}$	0 / +18	V
Junction temperature	T_j	175	$^\circ\text{C}$
Range of storage temperature	T_{stg}	-55 to +175	$^\circ\text{C}$

图 4. 绝对最大额定值 规格书摘录 ([SCT3030AW7](#) 示例)

热阻也是规格书中必会记载的信息之一(图 5)。

●Thermal resistance

Parameter	Symbol	Values			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Thermal resistance, junction - case ^{*6}	R_{thJC}	-	0.44	0.56	$^\circ\text{C/W}$

图 5. 规格书摘录 ([SCT3030AW7](#) 示例)

关于热阻，有各种各样的参数，例如表示结和周围环境之间的 RthJA 等，但功率器件的规格书中记载的则是热阻 RthJC。RthJC 是结和壳体之间的热阻值，其测量方法规定在 JEDEC Standard JESD51-14*1 中。

《热阻 RthJC 的测量方法和使用方法》(图 6) 总结了 RthJC 的测量方法和注意事项，是使用功率元器件的用户必须了解的信息。

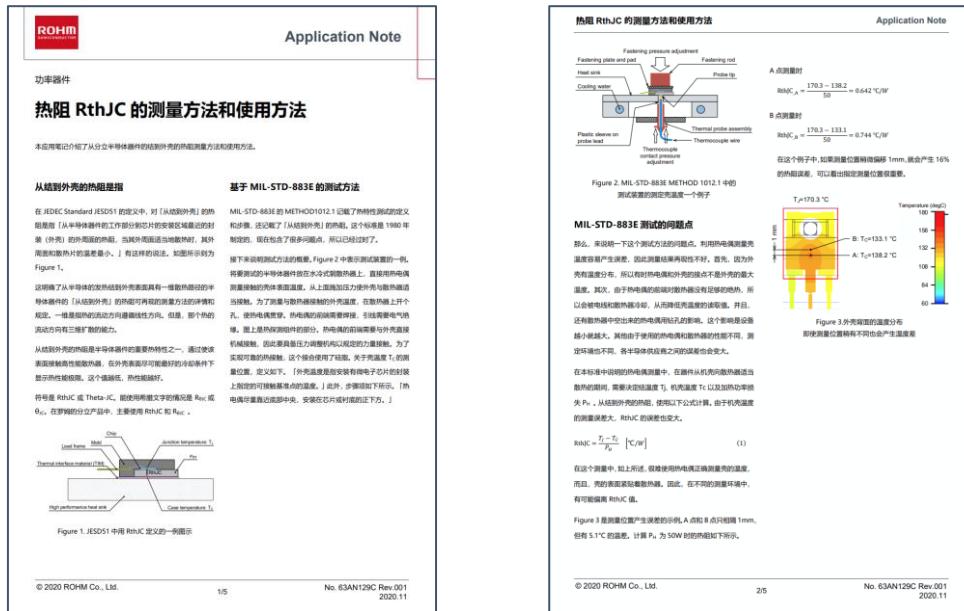


图 6. 热阻 RthJC 的测量方法和使用方法 (摘录)

与热阻一样重要的是发热量 (功耗)。发热量不仅会根据功率器件的特性而变化，而且会根据电路动作而变化，因此需要根据应用设备来计算。在《开关电路的功率损失计算》中，汇总了感性负载中开关动作时的发热量 (功耗) 的计算方法 (图 7)。

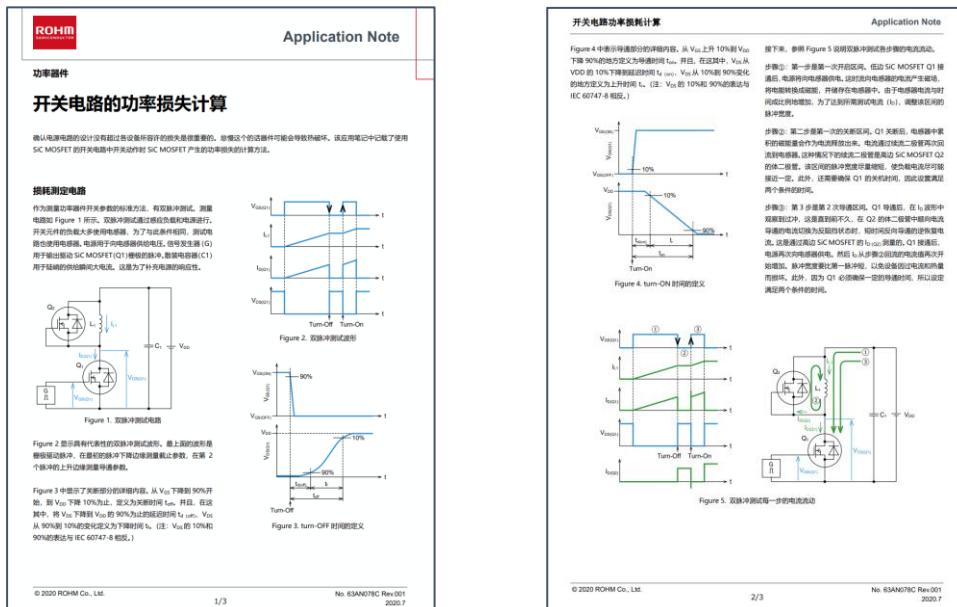
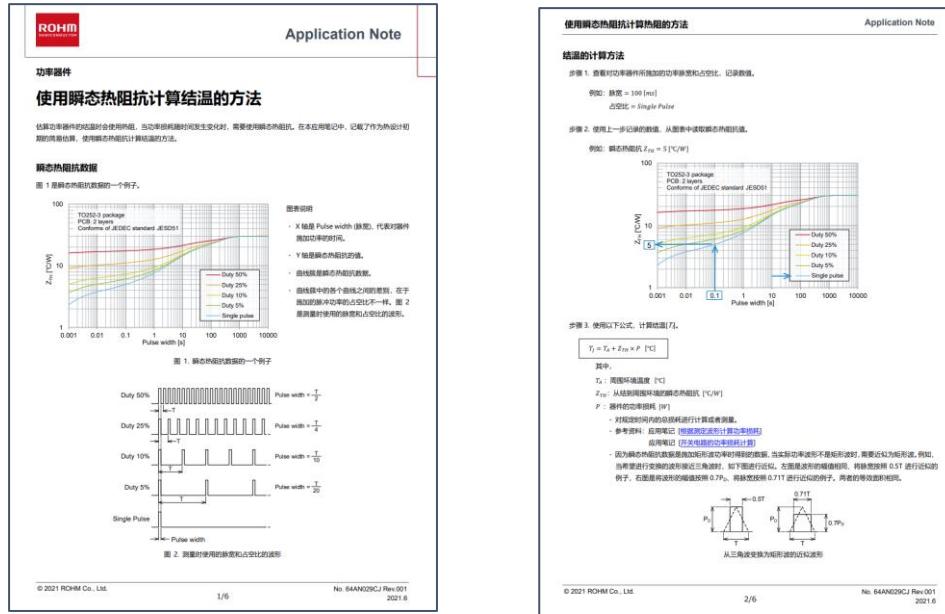


图 7. 开关电路的功率损失计算 (摘录)

当发热量（功耗）随时间而变化时，需要使用规格书中记载的瞬态热阻来求得结温。在《[使用瞬态热阻抗计算结温的方法](#)》（图 8）中，总结了使用瞬态热阻抗计算结温的方法。



步骤 3 活用热仿真

说到热设计的仿真，很多用户都会想到三维的 CFD(Computational Fluid Dynamics)仿真吧。一般使用 CFD 需要专业的知识，因此电路设计者可能不太熟悉。罗姆在网上公开了在大家经常使用的 SPICE 仿真软件中也可以使用的电路仿真热模型。在《[热模型是什么](#)》(图 9) 中，介绍了热模型。在《[热模型使用方法](#)》(图 10) 中，介绍了热模型的下载方法以及使用热模型进行热仿真的方法。

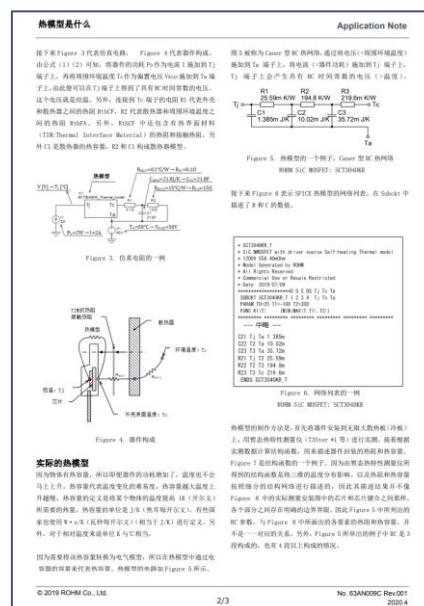
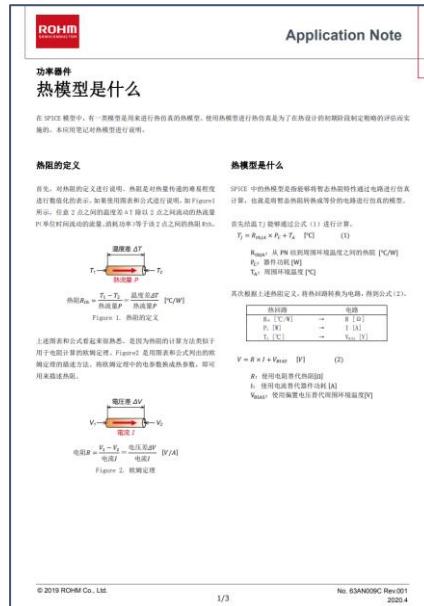


图 9. 热模型是什么 (摘录)

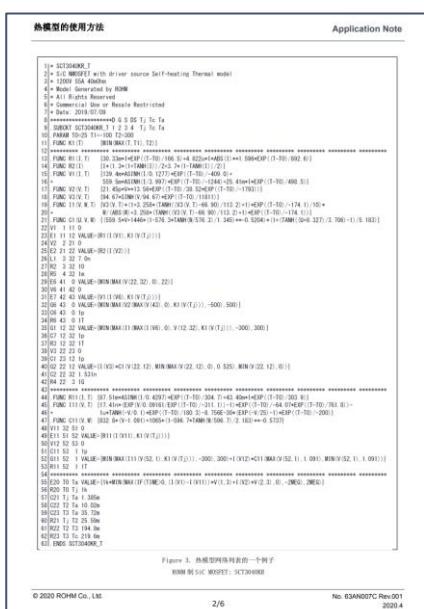


图 10. 热模型使用方法 (摘录)

需要注意的是，使用热模型的 SPICE 仿真适用于在设计的初始阶段估算结温，但并不适用于计算包含了绝缘片和散热片的应用设备整体的热阻。如需了解应用设备的散热性能，建议使用三维 CFD 仿真。在《[热仿真用 双热阻模型](#)》(图 11) 中总结了用于三维 CFD 仿真的模型。除总结模型中最简单的双热阻模型外，也介绍了其他模型如 DELPHI 模型和详细模型。关于三维 CFD 仿真用模型，如有需求也可以支持。但最终仍需要通过实测进行判断。



步骤 4 正确进行热测量

试制机完成后，有必要通过实测确认是否是按照设计完成的。热设计方面，首先应该确认的是“发热量（功耗）”。关于发热量的测量，请参考《根据测定波形计算功率损耗》(图 12)。

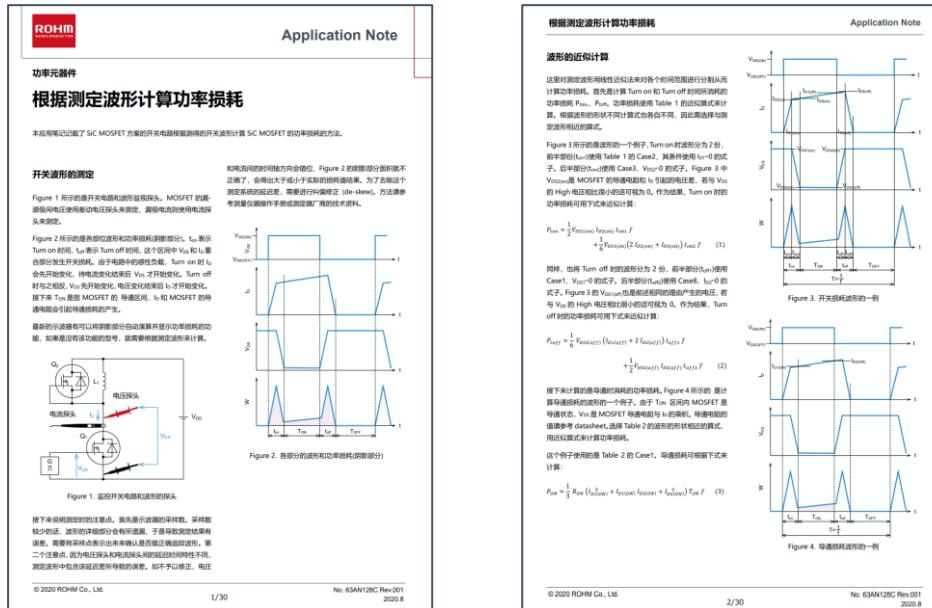


图 12. 根据测定波形计算功率损耗 (摘录)

关于抓取波形时经常会出现的倾斜误差问题，请参考总结了探针倾斜的重要性《[功率测量中探针校正的重要性 倾斜校正篇](#)》(图 13)。

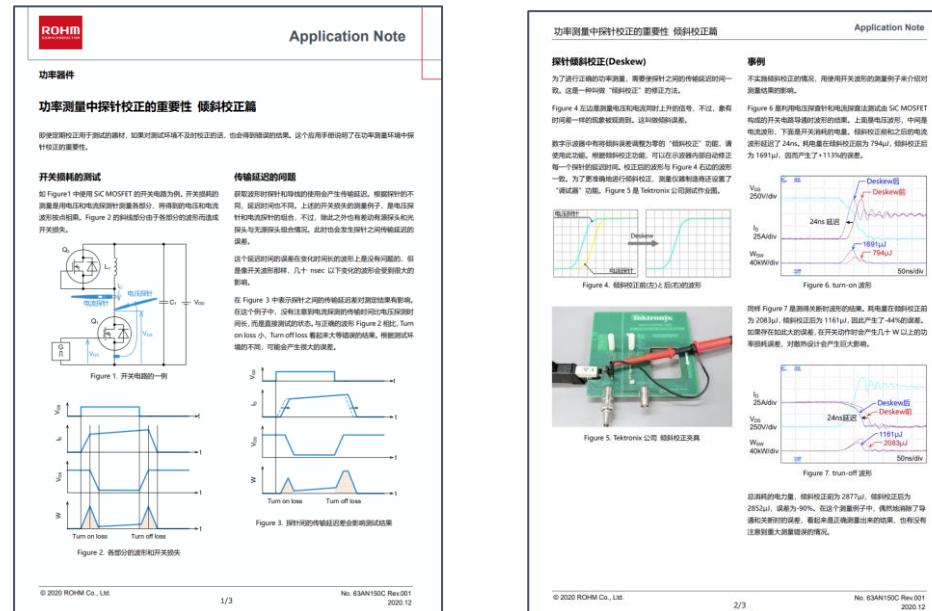


图 13. 功率测量中探针校正的重要性 倾斜校正篇 (摘录)

最后一项重要的是温度测量。在《[使用热电偶进行温度测量时的注意点](#)》(图 14) 中, 针对使用热电偶进行温度测量时存在的问题点, 结合实际的测量结果进行了汇总。在《[使用热电偶测量封装背面温度时的注意点](#)》(图 15) 中, 总结了用户偶尔会实施的在封装背面开槽测量温度时的注意点。该方法并不是作为半导体供应商推荐的方法, 在实施时需要十分小心谨慎地进行测量。

Application Note

Power Devices

Notes for Temperature Measurement Using Thermocouples

The surface temperature of a package is measured to estimate the junction temperature of a semiconductor device. However, correct results may not be obtained if the measurement is performed incorrectly. This application note explores cautions regarding the temperature measurement. The content of this application note is generally applicable, irrespective of the types of semiconductor devices.

Thermal measurement using thermocouples

Thermocouples are used as a means of measuring the surface temperature of semiconductor packages. However, care must be taken because the results obtained may be different from the actual conditions if the thermocouples are handled incorrectly. Although the surface temperature can also be measured using thermography, final products are enclosed in chassis and measurement largely cannot be viewed in most cases. Therefore, ROHM employs contact type measurements using thermocouples.

Notes when using thermocouples

The first point is regarding the type of thermocouple. Although there are 10 types of thermocouples, thermocouples referred to as Types K and T are suited for the surface temperature measurement of semiconductors. Table 1 summarizes the specifications of these two types of thermocouples. Although Type K has a small diameter, its positive electrode has a high thermal conductivity. The thermocouple may serve as a heat sink, decreasing the measured temperature from the actual temperature. Thus, it is considered that thermocouples of Class 1 Type K are ideal for the thermal measurement.

The second point is regarding the size of thermocouples. Since a thermocouple with a large wire diameter causes heat radiation from the thermocouple itself, the temperature of the measurement target is decreased below the actual value. To mitigate this effect, the thermocouple to be used should be as thin as possible. In the relevant JEDEC Standard, AWG 36 to 40 is recommended. At ROHM, AWG 38 (0.102 mm, 0.0040 inch) is normally employed.

IEC code	Component material	Positive electrode	Negative electrode	Class	Temperature range	Tolerance	Color code (reference)	
							JEDEC	ASTM E230
K	Nickel-chromium alloy $\kappa \approx 19\text{ W/mmK}$	Nickel-aluminum alloy $\kappa \approx 20\text{ W/mmK}$		1	-40 to 375 °C	$\pm 1.5 ^\circ\text{C}$	Blue	DS-0054E
				2	-40 to 333 °C	$\pm 2.5 ^\circ\text{C}$	Green	JEC C-1010-2012
				3	333 to 1200 °C	$\pm 0.0075\%(\theta)$	Yellow	ASTM E230
T	Copper	Copper-nickel alloy $\kappa \approx 385\text{ W/mmK}$		1	-165 to -187 °C	$\pm 2.5 ^\circ\text{C}$	Brown	DS-0054E
				2	-40 to 125 °C	$\pm 0.5 ^\circ\text{C}$	Blue	JEC C-1010-2012
				3	-200 to -47 °C	$\pm 0.1 ^\circ\text{C}$	Blue	ASTM E230

References: IEC 60584-1:2013
A: Thermal conductivity

Table 1. Summary of specifications of Type K and T thermocouples

© 2020 ROHM Co., Ltd. 1/5 No. 62AN154E Rev.001 APRIL 2020

Notes for Temperature Measurement Using Thermocouples Application Note

Figure 2 shows the results measured using thermocouples using different types of thermocouples with different wire diameters. The picture on the left shows an example in which Type K and AWG 38 (small wire diameter) is used, while the picture on the right shows an example in which Type T (higher thermal conductivity than that of Type K) and AWG 28 (large wire diameter) is used. Since the heat radiation through the thermocouple is larger on the right side, the measured temperature is 2.4% (16.7°C) lower than the left side. This effect becomes larger as the package size is decreased.

Figure 3 shows an example of a thermocouple with a welded tip as tip treatment. Alternatively, a thermocouple with a welded tip can be used.

Figure 4 shows an example of the difference in measured temperatures when the tip is welded or twisted. The twisted tip provided a result 2.3% (1.6°C) lower than the welded tip. This effect also becomes larger as the package size is decreased.

Figure 5 shows an example of thermocouple installation where diagonals are drawn from the four corners of the package and their intersection is used as a guide to install the thermocouple.

The fourth point is regarding the position for attaching the thermocouple. JEDEC Standard specifies that the package surface temperature should be measured at the center of the upper surface of the package. As the example of thermocouple installation in Figure 5 shows, draw diagonals from the four corners of the package and use their intersection as a guide to install the thermocouple.

Temperature measured at the first contact point
Section where heat is radiated

The best method is to weld the tip as shown in Figure 3. For welding, use a commercial spot welder for thermocouples.

© 2020 ROHM Co., Ltd. 2/5 No. 62AN154E Rev.001 APRIL 2020

图 14. [使用热电偶进行温度测量时的注意点](#) (摘录)

Application Note

功率元器件

使用热电偶测量封装背面温度时的注意点

本应用手册旨在为计算半导体芯片在实际动作时的温差, 使用热电偶测量封装背面温度时的注意点。

测量仪器的断开接线图

当使用热电偶测量封装背面温度时, 为了实现精度的调整, 需要把热电偶安装到基板上, 而不是 MOSFET 所用的 TO-247 封装。此时背面温度由于热电偶会把 Thermal Pad 与 Thermal Pad 以及 Drain 通在一起, 当接触热时 3 点会同时被加热, 从而导致热电偶的读数不准确。因此, 在热电偶的背面接线时, 需要将热电偶的背面接线与 Thermal Pad 上的热电偶接线断开, 并且热电偶接线与 Thermal Pad 上的热电偶接线断开后, 测量仪上也会输出电压。因此, 如果测量仪新的额定范围低于所输出的电压, 将无法正常测量。

图 1. TO-247 封装
背面接线有 Thermal Pad

图 2: 变换电容

图 3: 当热电偶直接插入热电偶时, TIM 分层并导致热阻恶化

© 2020 ROHM Co., Ltd. 1/2 No. 63AN131C Rev.001 2020.11

R_{thJC} 值的区间

热电偶的插入方法

对于使用 TIM 进行热阻测试时, 有一个方面是热 Thermal Pad 上的热电偶和背面接线引脚的热阻 (R_{thJC})。因此, 和热电偶相关的热阻的值, 在热阻的测量方法中是一样的, 请不要认为是一致的。数据手册的热阻是基于 JESD091-14 TD-05 的数据, 测量时不使用热电偶 (参考热电偶子节), 因此 R_{thJC} 的测量方法和测量方法一致。因此, 当使用热电偶测量背面温度时, 应该通过热电偶的热阻和背面接线的热阻之和来计算背面温度。并且, 热电偶的热阻和背面接线的热阻之和, 也应该通过热电偶的热阻和背面接线的热阻之和来计算背面温度。因此, 对于热电偶, 一定要根据产品规格书, 来选取热电偶的热阻和背面接线的热阻。另外, 为了保证测量精度, 需要将热电偶的热阻位置和种类、导热硅脂的种类等测量条件详细地进行说明。

图 4: 热电偶插入热电偶中, 使其热偶与芯片正下方的封装接触, 并使用粘合剂进行固定。使用热电偶时请遵照以下方法。
除了插座, 热电偶及其热偶接线的热阻应该被忽略。为了避免热电偶的热阻影响背面温度的测量, 请使用热电偶时, 先将 Thermal Pad 上的热电偶接线与背面接线的热偶接线断开, 然后将热电偶插入热电偶时, 会将热电偶的热阻产生影响, 并且, 测量结果会因为热电偶和热偶接线的种类、热的热阻而变。

图 4. 热电偶插入热偶中, 使其热偶与芯片的正下方接触, 并使用粘合剂进行固定。再将导热硅脂对热偶进行填充的方法

© 2020 ROHM Co., Ltd. 2/2 No. 63AN131C Rev.001 2020.11

图 15. [使用热电偶测量封装背面温度时的注意点](#) (摘录)

9

ROHM
SEMICONDUCTOR

结束语

本文按照步骤介绍了系列应用笔记，该系列应用笔记汇总了提高应用设备可靠性、削减设计返工工时所需的相关热设计信息。除此之外，针对从元器件选型到仿真、评价、基板制作等各个流程，罗姆还备有解决用户课题的最佳解决方案。通过这些内容，可以提高用户应用开发的速度，并为防止故障、不良的发生做出贡献。

本文介绍的应用笔记

《何谓热设计》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/what_is_thermal_design_an-c.pdf

《热阻和散热的基础》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/basics_of_thermal_resistance_and_heat_dissipation_an-c.pdf

《热阻 RthJC 的测量方法和使用方法》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/discrete/common/rthjc_measurement_and_usage_an-c.pdf

《开关电路的功率损失计算》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/pd_calc_power_dissipation_switching_cir_an-c.pdf

《使用瞬态热阻抗计算结温的方法》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/tj_from_transient_rth_data_an-c.pdf

《热模型是什么》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/discrete/sic/common/what_is_a_thermal_model_sic_an-c.pdf

《热模型使用方法》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/discrete/sic/common/how_to_use_thermal_models_an-c.pdf

《热仿真用 双热阻模型》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/two_resistor_model_for_thermal_simulation-c.pdf

《根据测定波形计算功率损耗》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/discrete/sic/common/pd_calc_power_loss_measured_waveform_an-c.pdf

《功率测量中探针校正的重要性 倾斜校正篇》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/importance_probe_calibration_descue_an-c.pdf

《使用热电偶进行温度测量时的注意点》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/en/products/databook/applinote/common/notes_on_temperature_measurement_using_thermocouples_an-e.pdf

《使用热电偶测量封装背面温度时的注意点》

https://rohmfs-rohm-com-cn.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/cn/products/databook/applinote/common/precautions_when_measuring_the_rear_of_the_package_with_a_thermocouple_an-c.pdf

参考资料

- *1. JESD51-14:2010, Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path

This document is intended to introduce ROHM's products (hereinafter "Products"). Any ROHM Products should be used in conjunction with the latest specifications and data sheet thereof. Please contact the sales office of ROHM or visit ROHM's web site. The information contained in this document is provided on an "as is" basis. ROHM shall not be in any way responsible or liable for any damages, expenses or losses incurred by you or third parties resulting from inaccuracy, error or use of such information. All information specified herein including but not limited to the typical functions of and examples of application circuits for the Products is for reference only. ROHM does not warrant that foregoing information will not infringe any intellectual property rights or any other rights of any third party regarding such information. ROHM shall bear no responsibility whatsoever for any dispute arising from the use of such technical information. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM and other parties. If you intend to export or ship overseas any Products or technology specified herein that may be controlled under the Foreign Exchange and Foreign Trade Act and other applicable export regulations, you will be required to obtain a license or permit under the acts and regulations. The content specified in this document is current as of MAR, 2022 and subject to change without any prior notice.