

功率器件

热模型使用方法

在 SPICE 模型中, 有与热仿真相关的被称为热模型的仿真模型。使用热模型进行仿真、在热设计的初期阶段就可以做出大致的估计。本应用笔记就热模型设计的相关方法进行说明。

热模型的获得

热模型可以在罗姆官网下载。在网站检索窗口, 检索型号、从检索结果点击该型号。跳转到具体型号页面、从「模型与工具」选项卡的设计模型中, 即可下载相关热计算模型。

热模型的概要

热模型的示例, 如 Figure 1。这是 1200V Nch SiC MOSFET SCT3040KR 的热模型、此图在产品规格书中也有记录。Tj 端子是结温温度、Tc 端子是壳温温度、Ta 端子是周围环境温度。

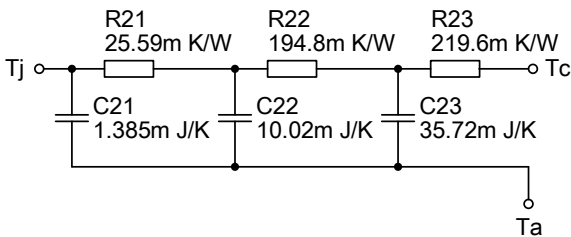


Figure 1. 热模型示例、Cauer 型 RC 热电路网络
ROHM SiC MOSFET: SCT3040KR

热模型网络列表的一个例子如 Figure 3 所示。此网络列表中、有记载 SiC MOSFET 电气模型和热模型。回路图是由 Figure 2 那样的元件与端子组成。

此外, 该模型还包括将 SiC MOSFET 的电气模型中产生的耗电 (自发热) 传递给热模型的功能。因此, 如平时那样进行电路模拟的话, Tj 端子会产生相当于结温度的电压。

接下来简单的看一下网络列表的内容。为了说明将 SiC MOSFET 产生的耗电传递给热模型的功能, Figure 4 示出了仅抽出网络列表主要部分的电路。分为三个块, A 块是 SiC MOSFET 部分, B 块是体二极管部分, C 块是热阻模型。

与 Figure 3 的网络列表相比, 行 13 至 42 对应于块 A, 行 44 至 53 对应于块 B, 行 55 至 62 对应于块 C。行 55 的 E 20 (电压控制电压源) 和行 56 的 R20 (电阻) 是将 SiC MOSFET 和本体二极管所产生的耗电作为电流量传递给热阻模型的 Tj 端子的组件。通常使用电流源向 Tj 端子供给相当于消耗功率的电

流值, 但电流源的输出阻抗较高, 初期值的收敛性较差, 所以将电压源和输出电阻组合起来表现低输出阻抗的电流源。输出阻抗 R 20 的 1kΩ 对于热阻是非常大的值。

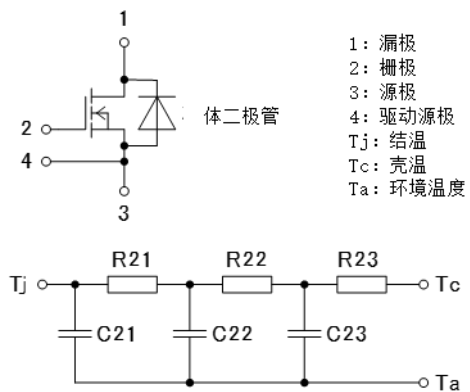


Figure 2. 热计算模型中包含的元件和引脚结构
ROHM 製 SiC MOSFET: SCT3040KR

下面介绍 SiC MOSFET 和体二极管中检测耗电的部分。这是在网络列表行 55 的 E 20 中记述的计算公式中进行的。将此部分抽取到式 (1) 中。

$$P_b = (I(V1) - I(V11)) \times V(1, 3) + I(V2) \times V(2, 3) \quad (1)$$

```

1 * SCT3040KR_T
2 * SiC NMOSFET with driver source Self-heating Thermal model
3 * 1200V 55A 40mOhm
4 * Model Generated by ROHM
5 * All Rights Reserved
6 * Commercial Use or Resale Restricted
7 * Date: 2019/07/09
8 *****D G S DS Tj Tc Ta
9 .SUBCKT SCT3040KR_T 1 2 3 4 Tj Tc Ta
10 .PARAM T0=25 T1=-100 T2=300
11 .FUNC K1(T) {MIN(MAX(T, T1), T2)}
12 *****
13 .FUNC R1(I, T) {30.33m*I*EXP((T-T0)/166.5)+4.822u*I*ABS(I)**1.596*EXP((T-T0)/892.6)}
14 .FUNC R2(I) {I*(1.3*(1+TANH(I))/2+3.7*(1-TANH(I))/2)}
15 .FUNC V1(I, T) {139.4m*ASINH(I/0.1277)*EXP((T-T0)/-409.0)+
16 + 559.5m*ASINH(I/3.997)*EXP((T-T0)/-1244)+25.41m*I*EXP((T-T0)/498.5)}
17 .FUNC V2(V, T) {21.45p*V**13.56*EXP((T-T0)/38.52*EXP((T-T0)/-1793))}
18 .FUNC V3(V, T) {94.67*SINH(V/94.67)*EXP((T-T0)/11811)}
19 .FUNC I1(V, W, T) {V3(V, T)*(1+3.258*(TANH((V3(V, T)-66.90)/113.2)+1)*EXP((T-T0)/-174.1)/10)*
20 + W/(ABS(W)+3.258*(TANH((V3(V, T)-66.90)/113.2)+1)*EXP((T-T0)/-174.1))}
21 .FUNC C1(U, V, W) {(559.5*V+1446*(1-576.3*TANH(W/576.3))/1.345)**-0.5204*(1+(TANH((U+8.327)/3.706)-1)/5.183)}
22 V1 1 11 0
23 E1 11 12 VALUE={R1(I(V1), K1(V(Tj)))}
24 V2 2 21 0
25 E2 21 22 VALUE={R2(I(V2))}
26 L1 3 32 7.0n
27 R2 3 32 10
28 R5 4 32 1m
29 E6 41 0 VALUE={MIN(MAX(V(22, 32), 0), 22)}
30 V6 41 42 0
31 E7 42 43 VALUE={V1(I(V6), K1(V(Tj)))}
32 G6 43 0 VALUE={MIN(MAX(V2(MAX(V(43), 0), K1(V(Tj))), -500), 500)}
33 C6 43 0 1p
34 R6 43 0 1T
35 G1 12 32 VALUE={MIN(MAX(I1(MAX(I(V6), 0), V(12, 32), K1(V(Tj))), -300), 300)}
36 C7 12 32 1p
37 R3 12 32 1T
38 V3 22 23 0
39 C1 23 12 1p
40 G2 22 12 VALUE={I(V3)*C1(V(22, 12), MIN(MAX(V(22, 12), 0), 0.525), MIN(V(22, 12), 0))}
41 C2 22 32 1.531n
42 R4 22 3 1G
43 *****
44 .FUNC R11(I, T) {87.51m*ASINH(I/0.4297)*EXP((T-T0)/304.7)+43.40m*I*EXP((T-T0)/303.9)}
45 .FUNC I11(V, T) {17.41n*(EXP(V/0.09161/EXP((T-T0)/-311.1))-1)*EXP((T-T0)/-64.07*EXP((T-T0)/761.8))-
46 + 1u*TANH(-V/0.1)*EXP((T-T0)/180.3)-8.756E-30*(EXP(-V/25)-1)*EXP((T-T0)/-200)}
47 .FUNC C11(V, W) {832.8*(V-1.091)+1065*(1-596.7*TANH(W/596.7)/2.183)**-0.5737}
48 V11 32 51 0
49 E11 51 52 VALUE={R11(I(V11), K1(V(Tj)))}
50 V12 52 53 0
51 C11 53 1 1p
52 G11 52 1 VALUE={MIN(MAX(I11(V(52, 1), K1(V(Tj))), -300), 300)+I(V12)*C11(MAX(V(52, 1), 1.091), MIN(V(52, 1), 1.091))}
53 R11 52 1 1T
54 *****
55 E20 T0 Ta VALUE={1k*MIN(MAX(IF(TIME>0, (I(V1)-I(V11))*V(1, 3)+I(V2)*V(2, 3), 0), -2MEG), 2MEG)}
56 R20 T0 Tj 1k
57 C21 Tj Ta 1.385m
58 C22 T2 Ta 10.02m
59 C23 T3 Ta 35.72m
60 R21 Tj T2 25.59m
61 R22 T2 T3 194.8m
62 R23 T3 Tc 219.6m
63 .ENDS SCT3040KR_T

```

Figure 3. 热模型网络列表的一个例子

ROHM 制 SiC MOSFET: SCT3040KR

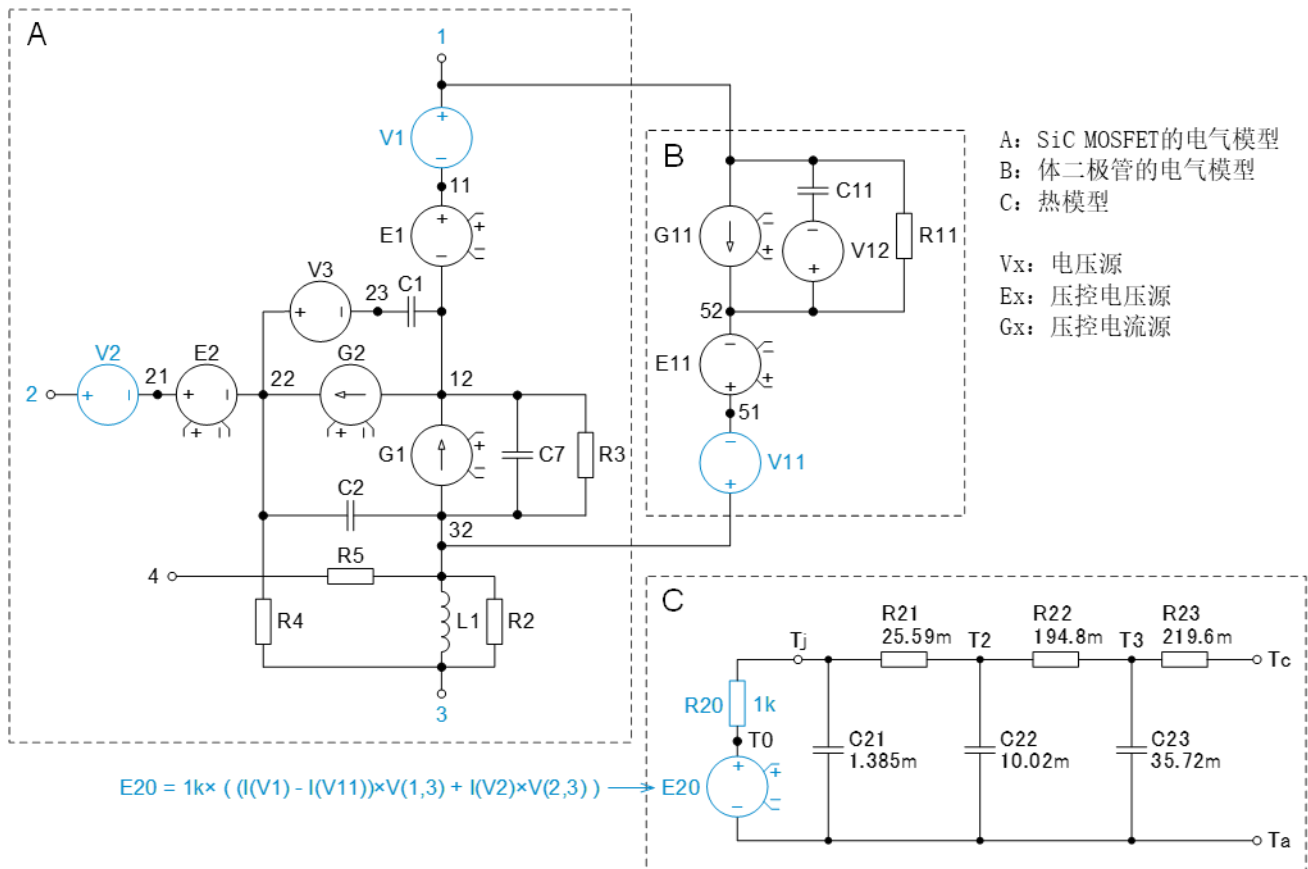


Figure 4. 为了说明将 SiC MOSFET 产生的消耗功率向热模型传递的功能，只抽出网络列表的主要部分的电路

ROHM SiC MOSFET: SCT3040KR

在第 1 项中， $I(V1)$ 为 SiC MOSFET 的漏极源间流动的电流， $I(V11)$ 为流向体内二极管的电流。将各自相加后的电流值（注意 $V11$ 的极性）乘以漏极源极间电压 $V(1,3)$ 来计算漏极源极之间的耗电。第 2 项是 $I(V2)$ 流向栅极源之间的电流， $V(2,3)$ 为栅极源间的电压。通过乘以两者来计算门源之间的损失。通过加上第 1 项和第 2 项的数值来检测整体的消耗功率。

仿真电路概要

使用热模型的一般仿真电路如 Figure 5 所示。Figure 6 显示当时的设备构成。将周围环境温度 T_A 作为偏置电压 V_{BIAS} 施加到 T_a 端子上，将设备的耗电 P_D 作为电流 I 施加到 T_j 端子上， T_j 端子上会产生具有 RC 时间常数的电压。这个电压是结温度。另外，连接到 T_c 端子的电阻是 $R1$ 在外壳和散热器之间的热阻 R_{thCF} ， $R2$ 在散热器和周围环境温度之间的热阻 R_{thFA} 。另外， R_{thCF} 还含有热界面材料（TIM: Thermal Interface Material）的热阻和接触热阻。C1 是散热器的热容量，R2 和 C1 构成散热器。

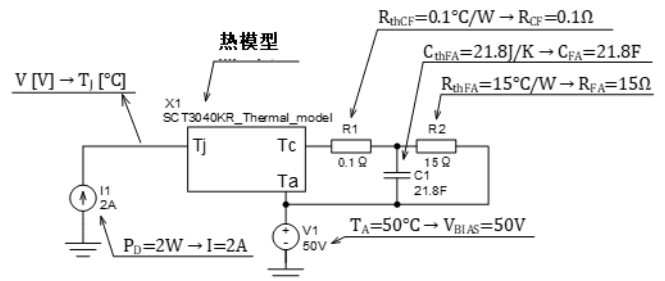


Figure 5. 仿真电路的一例

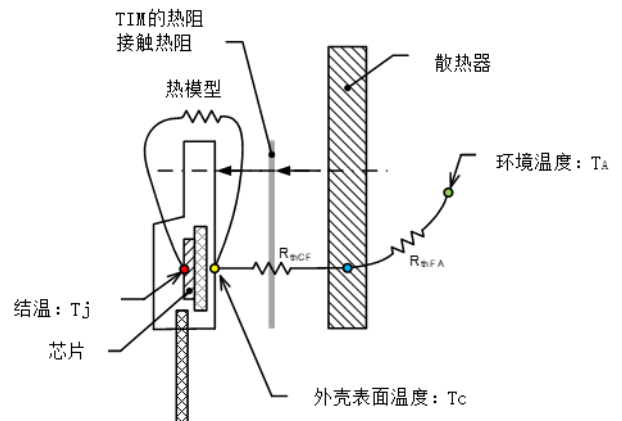


Figure 6. 器件的构成

仿真方法

根据所使用的模拟器不同，设置方法也不同，这里使用 SystemVision (Mentor Graphics Corp.) 进行说明。

首先，参照网络列表创建电路符号。在网络列表的行 8 到 9 上写着端子信息。在本示例中，按电气模型 D (Drain)、G (Gate)、S (Source)、DS (Driver Source) 的顺序分配端子 1、2、3、4，再按热模型 Tj、Tc、Ta 端子的顺序分配端子 Tj、Tc、Ta，共制作 7 端子的电路符号。7 端子整齐的话，符号的设计是自由的。制作示例如图 7 所示。虽然有两个组件，但是为了便于书写仿真电路而分离，这是一个象征。

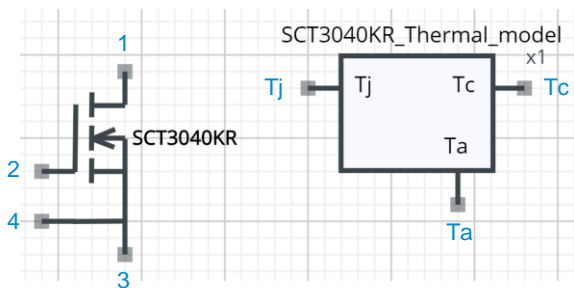


Figure 7. 热模型的电路符号制作例

热模型的网络列表是按照 PSpice 进行语法描述的，所以在 SystemVision 中使用时会发生语法错误。在本示例中，需要将网络列表行 55 中的 IF 语句修正为 VALIF:

原文

```
E20 TO Ta VALUE={1k*MIN(MAX(IF(TIME>0, (I(V1)-I(V11))*V(1,3)+I(V2))*V(2,3),0), -2MEG), 2MEG)}
```

修正后

```
E20 TO Ta VALUE={1k*MIN(MAX(VALIF(TIME>0, (I(V1)-I(V11))*V(1,3)+I(V2))*V(2,3),0), -2MEG), 2MEG)}
```

Figure 8 是仿真电路。在这里，我们将模拟在通孔封装的 TO-247-4L (Figure 9) 上安装散热片的状态。电路图的左半部是电路，右半部是热模型电路，求 SiC MOSFET:SCT 3040 KR 的结温 Tj。

电路在 SiC MOSFET 的栅极上输入来自信号源 vsrc 2 的矩形波，进行开关动作。电源由 vsrc 1 供给 DC 600 V，经由 45 Ω 的负载电阻 r1 连接到 SiC MOSFET 的漏极。SiC MOSFET 接通后，漏极电流约为 13A。此时，SiC MOSFET 的导通电阻和漏极电流会导致导通损失。SiC MOSFET 的栅极和漏极的电压波形如图 10 所示。

在热模型电路的 Ta 端子上连接与周围环境温度对应的电压源 vsrc 3，给予电压 (1°C=1V)。因为 Tc 端子是封装壳体，所以通过 r 4 (=外壳和散热器之间的热阻 RthCF) 和 r 5 (=散热器和周围环境温度之间的热阻 RthFA) 连接到 Ta 端子。r 4 设想了外壳和散热片之间的硅润滑油等。r 5 是散热器的热阻。r 4、

r 5 均以电阻值 (1°C/W=1Ω) 给出值。c 1 用散热器的热容量与 Ta 端子连接。r 5 和 c 1 构成散热器。c 1 的热容量值参照散热器的数据表或公式 (2) 中使用概算值。c 1 的值用容量值 (1J/K=1F) 给出。

$$\text{热容量 } C = c \times \rho \times V \quad [J/K] \quad (2)$$

c: 比热 [kJ/kg·K]

ρ: 密度 [g/cm³]

V: 体积 [cm³]

例如，铝散热器的形状为 3cm×3cm×1cm 的长方体的情况下，通过以下计算求出。

铝的比热 c = 0.896 [kJ/kg·K]

铝的密度 ρ = 2.71 [g/cm³]

体积 V = 3 × 3 × 1 = 9 [cm³]

$$C = 0.896 \times 2.71 \times 9 = 21.8 [J/K] = 21.8 [F] \quad (3)$$

为了获得结温度 (=Tj 点的电压)，需要将 SiC MOSFET 产生的耗电转换成电流，然后施加到热模型的 Tj 引脚上，如上所述，这是通过热模型内的计算公式 (1) 进行的。另外，连接在 Tj 端子和接地之间的电阻 r 3 是为了防止 Tj 端子悬空时发生仿真错误，通过对仿真计算没有影响的 r 3 进行终端处理。

最后进行暂态分析，通过测量 Tj 的电压，判断结温 (1V=1°C)。

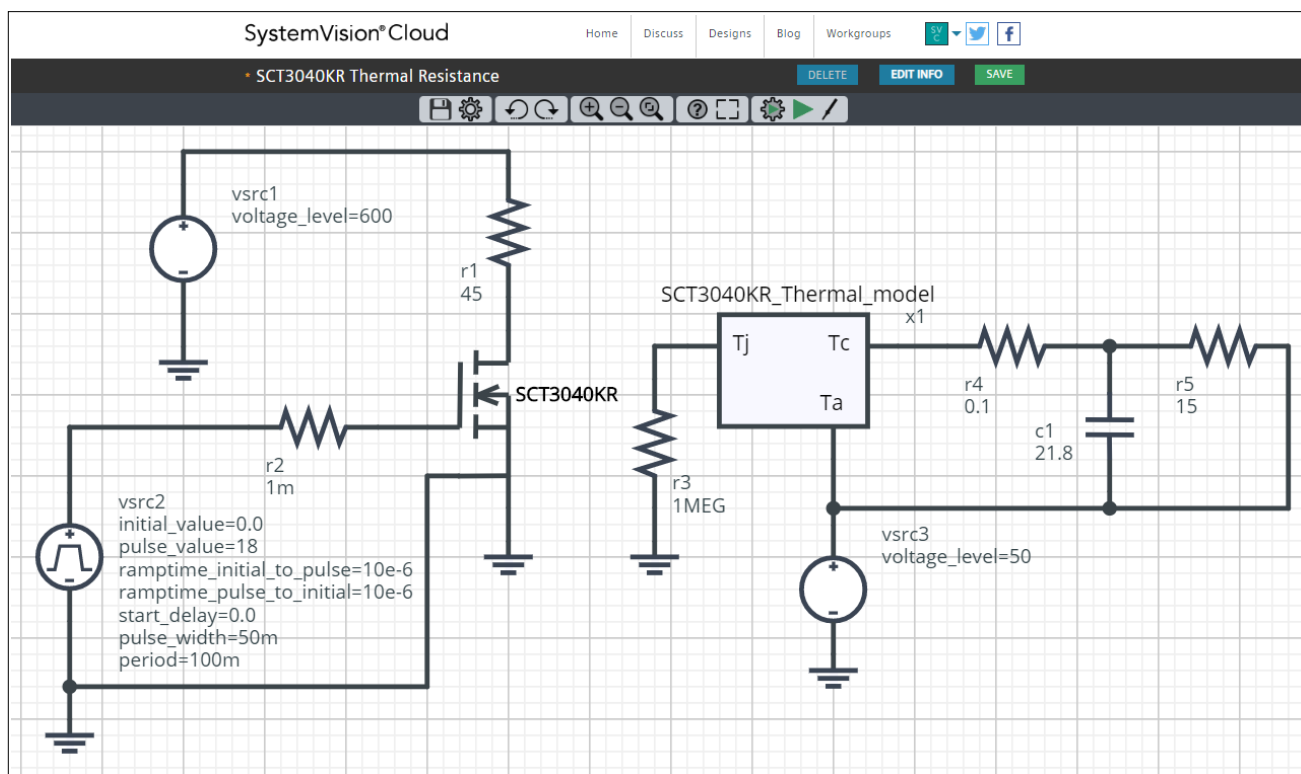


Figure 8. 仿真电路



Figure 9. TO-247-4L 封装

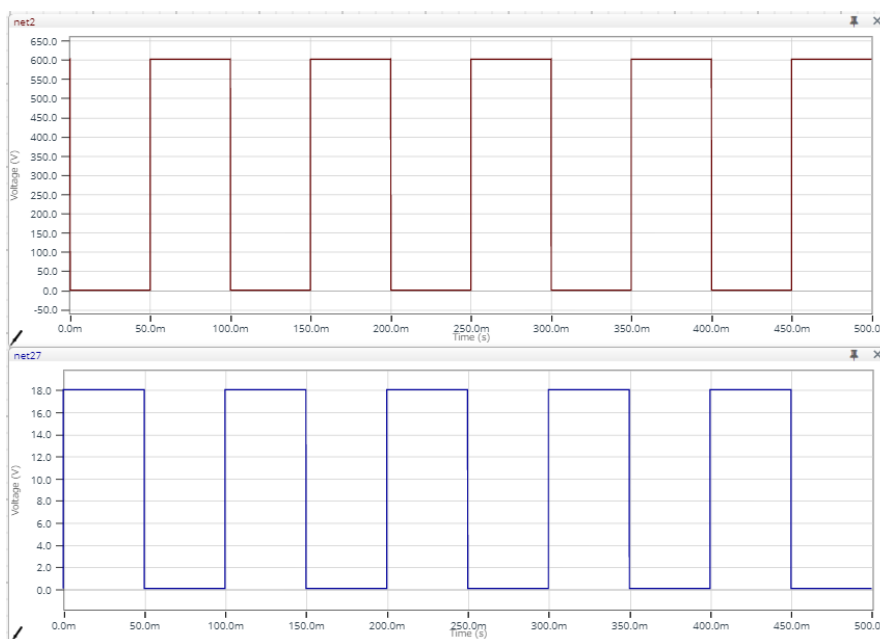


Figure 10. x1 の Gate (下) 和 Drain (上) の电压图形

下面介绍实施例。如果希望器件结温达到 100°C 时使电路停止工作，以该条件来设计抑制温度上升的保护电路时，通过热仿真求出电路停止工作之前的持续工作时间。

条件是，安装形状为 $3\text{cm}\times 3\text{cm}\times 1\text{cm}$ 的铝散热片，假设 r_4 是外壳和散热片之间的导热硅脂，其热阻为 $0.1\text{W}/^{\circ}\text{C}$ ；假设 r_5 是

散热片的热阻为 $15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，假设 c_1 是散热器的热容量，按照上述公式 (3) 计算得到的数值进行设定。环境温度是 50°C 。

Figure 11 显示了本次的结果。电路动作开始后约 350 秒发现结温达到 100°C 。

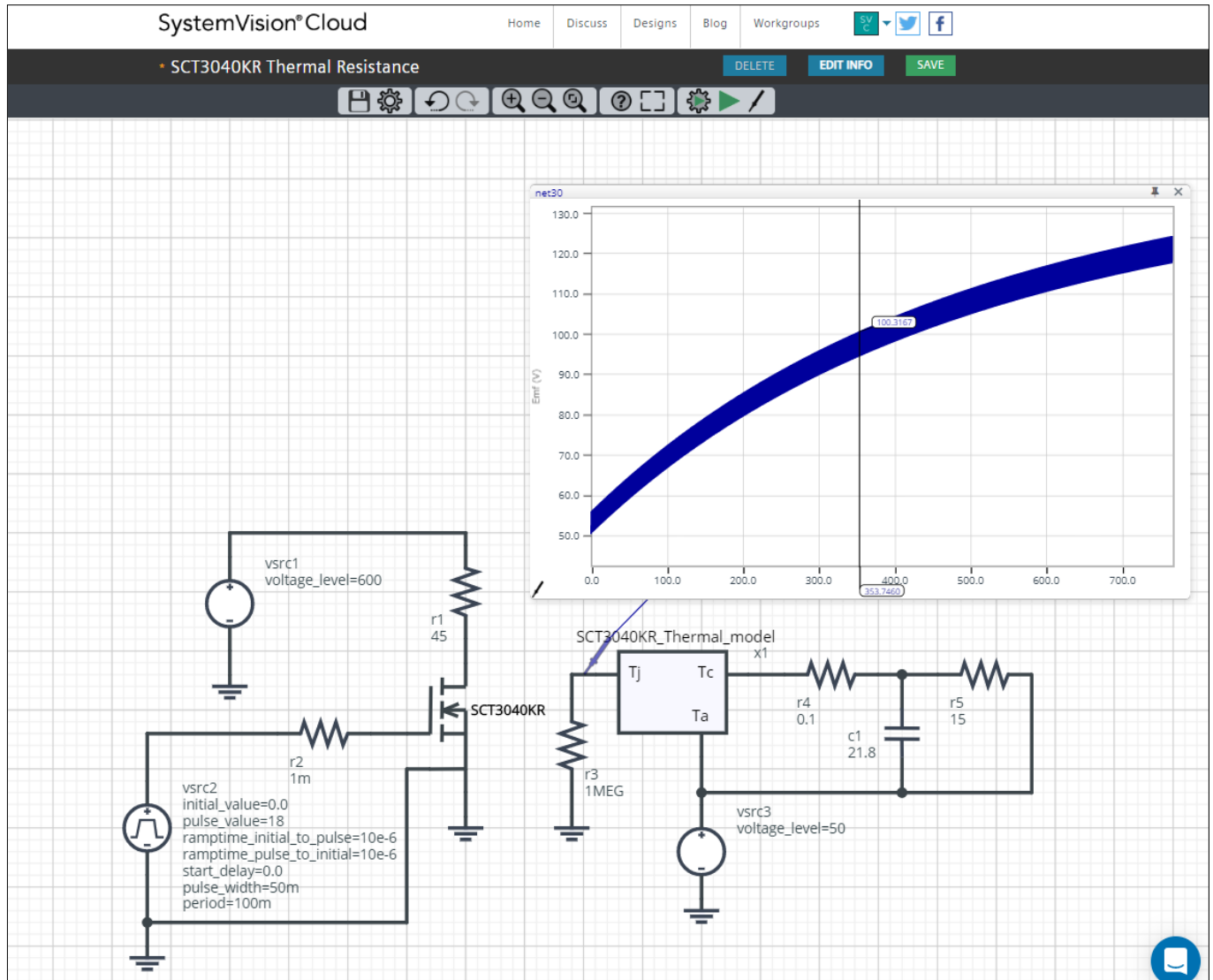


Figure 11. 对安装有散热片的条件下，结温达到 100°C 所需要花费的时间进行暂态仿真的结果

假设铝散热片的热阻为 $15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、形状为 $3\text{cm}\times 3\text{cm}\times 1\text{cm}$

ROHM SiC MOSFET: SCT3040KR

SystemVision[®]是Mentor Graphics Corp.的注册商标。

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

<http://www.rohm.com/contact/>