

功率器件

# 开关电路的功率损失计算

确认电源电路的设计没有超过各设备所容许的损失是很重要的。怠慢这个的话器件可能会导致热破坏。该应用笔记中记载了使用 SiC MOSFET 的开关电路中开关动作时 SiC MOSFET 产生的功率损失的计算方法。

## 损耗测定电路

作为测量功率器件开关参数的标准方法，有双脉冲测试。测量电路如 Figure 1 所示。双脉冲测试通过感应负载和电源进行。开关元件的负载大多使用电感器，为了与此条件相同，测试电路也使用电感器。电源用于向电感器供给电压。信号发生器 (G) 用于输出驱动 SiC MOSFET (Q1) 栅极的脉冲。散装电容器 (C1) 用于陡峭的供给瞬间大电流。这是为了补充电源的响应性。

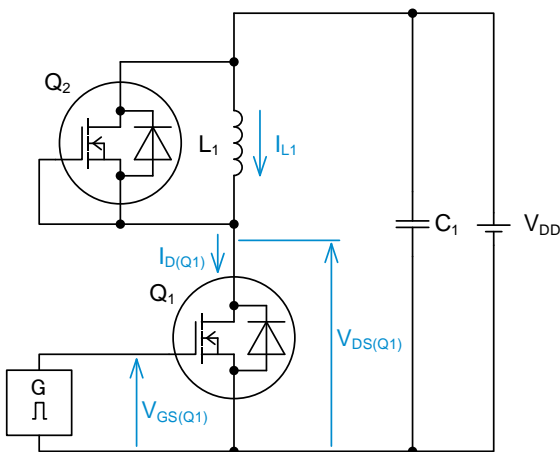


Figure 1. 双脉冲测试电路

Figure 2 显示具有代表性的双脉冲测试波形。最上面的波形是栅极驱动脉冲，在最初的脉冲下降边缘测量截止参数，在第 2 个脉冲的上升边缘测量导通参数。

Figure 3 中显示了关断部分的详细内容。从  $V_{GS}$  下降到 90% 开始，到  $V_{DD}$  下降 10% 为止，定义为关断时间  $t_{off}$ 。并且，在这其中，将  $V_{DS}$  下降到  $V_{DD}$  的 90% 为止的延迟时间  $t_{d(off)}$ 、 $V_{DS}$  从 90% 到 10% 的变化定义为下降时间  $t_f$ 。(注： $V_{DS}$  的 10% 和 90% 的表达与 IEC 60747-8 相反。)

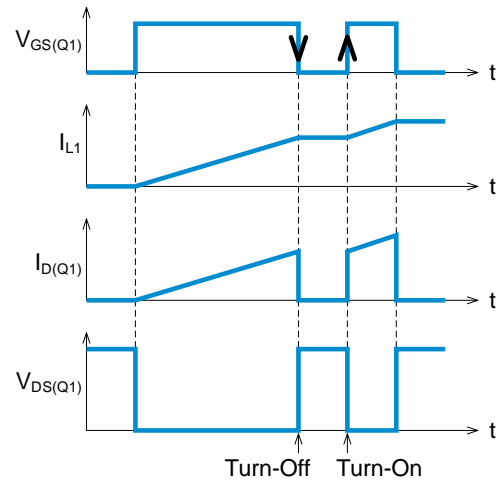


Figure 2. 双脉冲测试波形

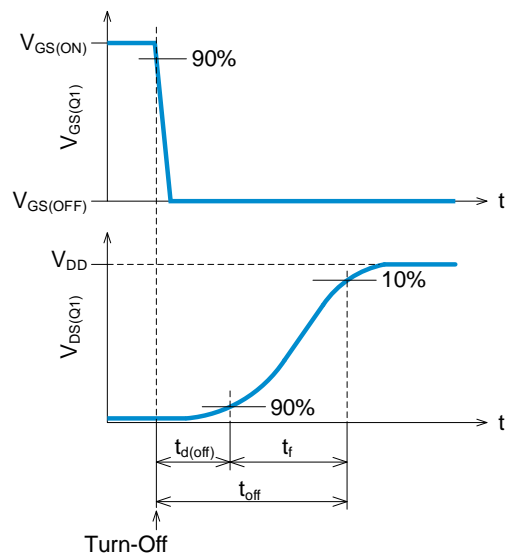


Figure 3. turn-OFF 时间的定义

Figure 4 中表示导通部分的详细内容。从  $V_{GS}$  上升 10% 到  $V_{DD}$  下降 90% 的地方定义为导通时间  $t_{on}$ 。并且，在这其中， $V_{DS}$  从  $V_{DD}$  的 10% 下降到延迟时间  $t_{d(on)}$ ， $V_{DS}$  从 10% 到 90% 变化的地方定义为上升时间  $t_r$ 。（注： $V_{DS}$  的 10% 和 90% 的表达与 IEC 60747-8 相反。）

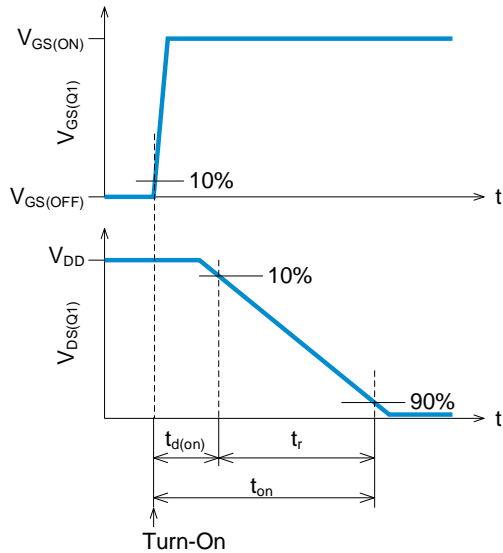


Figure 4. turn-ON 时间的定义

接下来，参照 Figure 5 说明双脉冲测试各步骤的电流流动。

步骤①：第一步是第一次开启区间。低边 SiC MOSFET Q1 接通后，电源将向电感器供电。这时流向电感器的电流产生磁场，将电能转换成磁能，并储存在电感器中。由于电感器电流与时间成比例地增加，为了达到所需测试电流 ( $I_D$ )，调整该区间的脉冲宽度。

步骤②：第二步是第一次的关断区间。Q1 关断后，电感器中累积的磁能量会作为电流释放出来。电流通过续流二极管再次回流到电感器。这种情况下的续流二极管是高边 SiC MOSFET Q2 的体二极管。该区间的脉冲宽度尽量缩短，使负载电流尽可能接近一定。此外，还需要确保 Q1 的关机时间，因此设置满足两个条件的的时间。

步骤③：第 3 步是第 2 次导通区间。Q1 导通后，在  $I_D$  波形中观察到过冲，这是直到前不久，在 Q2 的体二极管中顺向电流导通的电流切换为反阻挡状态时，短时间反向导通的逆恢复电流。这是通过高边 SiC MOSFET 的  $I_{D(Q2)}$  测量的。Q1 接通后，电源再次向电感器供电。然后  $I_D$  从步骤②回流的电流值再次开始增加。脉冲宽度要比第一脉冲短，以免设备因过电流和热量而损坏。此外，因为 Q1 必须确保一定的导通时间，所以设定满足两个条件的的时间。

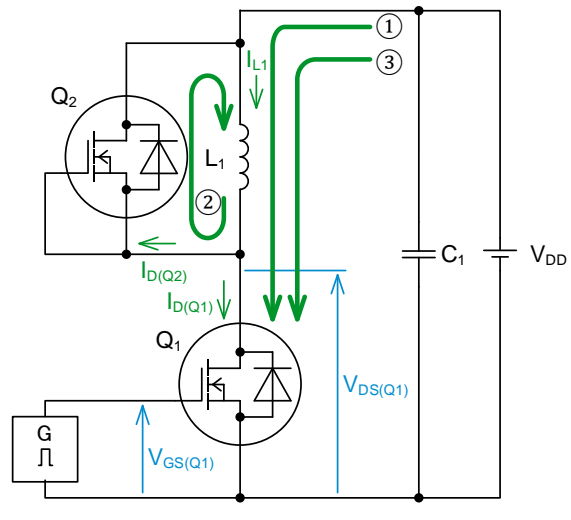
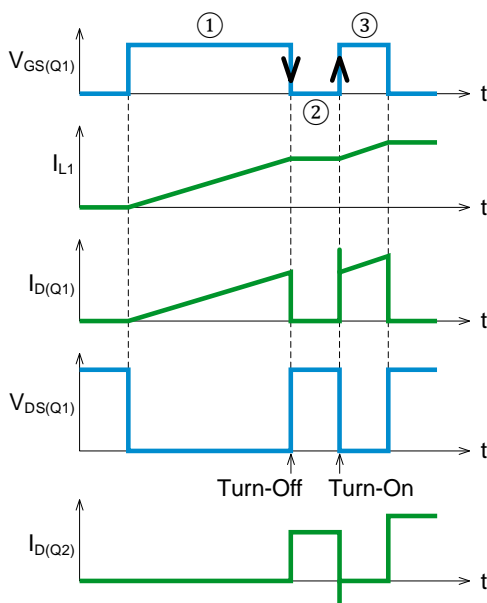


Figure 5. 双脉冲测试每一步的电流流动

### 损失计算

在 Figure1 的测试电路中，低侧 SiC MOSFET 产生的损失有开关损失和导通损失。理想的开关波形中，如 Figure 5 所示， $V_{DS(Q1)}$  和  $I_{D(Q1)}$  不会延迟，电压和电流会垂直变化。这种状态下不会产生多余的电压和电流，所以不会发生损失。实际上由于寄生电阻和寄生容量的影响会产生延迟，电压和电流波形会像 Figure 6 那样以  $t_{on}$ 、 $t_{off}$  的倾斜变化。这个倾斜部分的电压和电流重叠的部分是开关损失。

在实际电路中，导通和关断时的过渡期电压和电流会呈指数变化，但是观测到的波形很难用指数函数表示，所以用直线近似来计算。

根据 Figure 6 的波形，计算每个区间用 Q1 消耗的电力量。首先，在导通  $t_{on}$  及关断  $t_{off}$  时间(开关时间)中消耗的电力量  $W_{SW}$  可以近似于式 (1)。

$$\begin{aligned}
 W_{SW} \approx & \frac{1}{2} V_{DS1(on)} I_{D2(on)} t_{on1} \\
 & + \frac{1}{6} V_{DS1(on)} (2 I_{D2(on)} + I_{D3(on)}) t_{on2} \\
 & + \frac{1}{6} V_{DS2(off)} (I_{D1(off)} + 2 I_{D2(off)}) t_{off1} \\
 & + \frac{1}{2} V_{DS2(off)} I_{D2(off)} t_{off2} \quad [J] \quad (1)
 \end{aligned}$$

接着计算导通时消耗的功率。因为 Figure 6 在  $T_{ON}$  的区间 Q1 导通，所以  $V_{DS}$  成为 Q1 的导通电阻和  $I_D$  的积。导通电阻的值参照数据表。功率  $W_{ON}$  可通过式 (2) 近似。

$$W_{ON} \approx \frac{1}{3} R_{ON(Q1)} (I_{D3(on)}^2 + I_{D3(on)} I_{D1(off)} + I_{D1(off)}^2) T_{ON} \quad [J] \quad (2)$$

其中， $R_{ON(Q1)}$ : Q1 的导通电阻[Ω]

$T_{ON}$ : Q1 的开启时间[s]

接下来是 Q1 关断时的功率。Figure 6 是  $T_{OFF}$  的区间，Q1 OFF 时  $I_D$  变为零，功率  $W_{OFF}$  变为零 (式 3)。

$$W_{OFF} = 0 \quad [J] \quad (3)$$

Q1 的全部功率可以通过式 (4) 求出，成为式 (1) 到 (3) 的总和。

$$W = W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF} \quad [J] \quad (4)$$

另外，Q1 的功率损失可以用公式 (5) 计算。

$$P = \frac{W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF}}{T} = (W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF}) f \quad [W] \quad (5)$$

其中， $T$ : 切换周期[s]

$f$ : 开关频率[Hz]

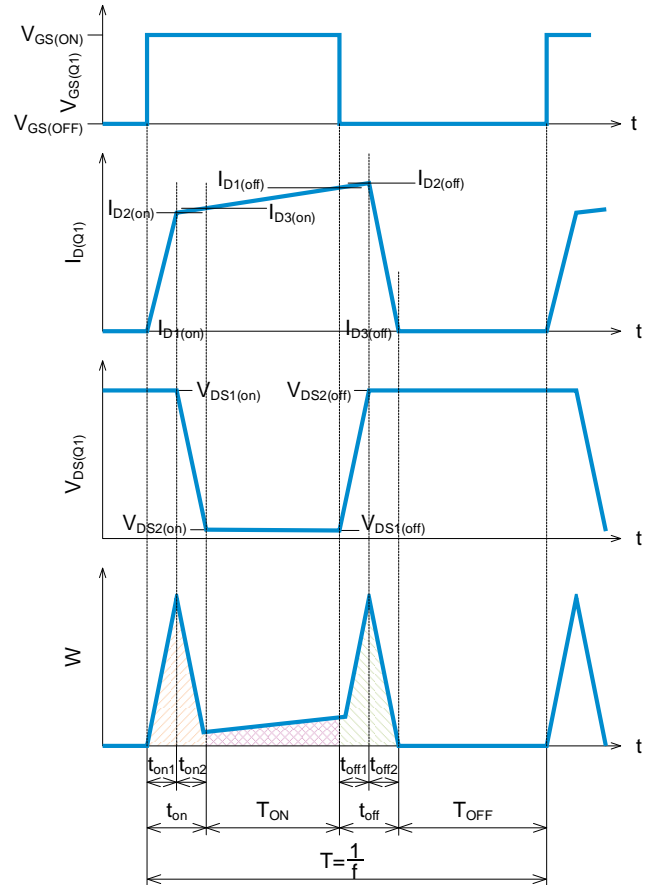


Figure 6. 损耗计算波形 (例)

如上所述，损失是通过电压和电流重叠的部分进行积分近似来计算的，但其他资料中也有不同的公式。例如，这个重叠的部分有时会用更简化的公式来计算三角形和梯形的面积。在这些例子中，即使简化了计算结果误差也很小的情况下使用。

### 参考資料

- [1] IEC60747-8:2010, *Semiconductor devices – Discrete devices – Part 8: Field-effect transistors*

## ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。  
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。  
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。  
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。  
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。  
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。  
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。  
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

**ROHM Customer Support System**

<http://www.rohm.co.jp/contact/>