

功率元器件

根据测定波形计算功率损耗

本应用笔记记载了 SiC MOSFET 方案的开关电路根据测得的开关波形计算 SiC MOSFET 的功率损耗的方法。

开关波形的测定

Figure 1 所示的是开关电路和波形监视探头。MOSFET 的漏-源级间电压使用差分电压探头来测定，漏极电流则使用电流探头来测定。

Figure 2 所示的是各部位波形和功率损耗(阴影部分)。 t_{on} 表示 Turn on 时间, t_{off} 表示 Turn off 时间, 这个区间中 V_{DS} 和 I_D 重合部分发生开关损耗。由于电路中的感性负载, Turn on 时 I_D 会先开始变化, 待电流变化结束后 V_{DS} 才开始变化。Turn off 时与之相反, V_{DS} 先开始变化, 电压变化结束后 I_D 才开始变化。接下来 T_{ON} 是指 MOSFET 的 导通区间, I_D 和 MOSFET 的导通电阻会引起导通损耗的产生。

最新的示波器有可以将阴影部分自动演算并显示功率损耗的功能, 如果是没有该功能的型号, 就需要根据测定波形来计算。

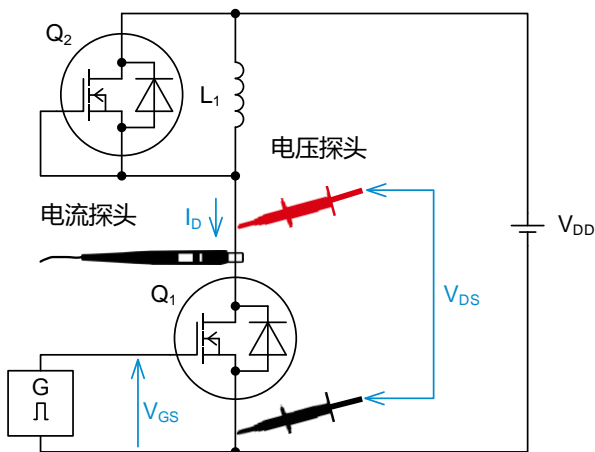


Figure 1. 监控开关电路和波形的探头

接下来说明测定时的注意点。首先是示波器的采样数。采样数较少的话, 波形的详细部分会有所遗漏, 于是导致测定结果有误差。需要将采样点表示出来来确认是否能正确追踪波形。第二个注意点, 因为电压探头和电流探头间的延迟时间特性不同, 测定波形中包含该延迟差所导致的误差。如不予以修正, 电压

和电流间的时间轴方向会错位、Figure 2 的阴影部分面积就不正确了, 会得出大于或小于实际的损耗值结果。为了去除这个测定系统的延迟差, 需要进行纠偏修正 (de-skew)。方法请参考测量仪器操作手册或测定器厂商的技术资料。

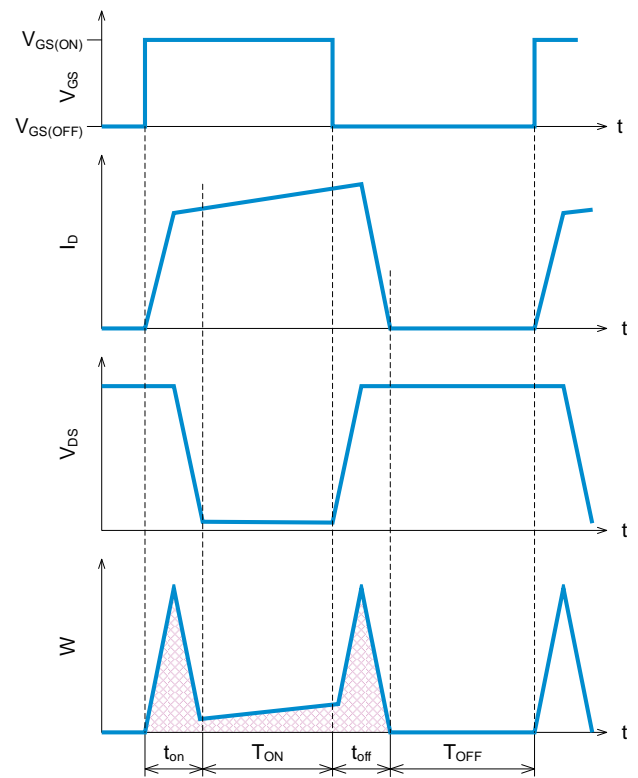


Figure 2. 各部分的波形和功率损耗(阴影部分)

波形的近似计算

这里对测定波形用线性近似法来对各个时间范围进行分割从而计算功率损耗。首先是计算 Turn on 和 Turn off 时间所消耗的功率损耗 P_{ton} 、 P_{toff} 。功率损耗使用 Table 1 的近似算式来计算。根据波形的形状不同计算式也各自不同，因此需选择与测定波形相近的算式。

Figure 3 所示的是波形的一个例子，Turn on 时波形分为 2 份，前半部份(t_{on1})使用 Table 1 的 Case2，其条件使用 $I_{D1}=0$ 的式子。后半部分(t_{on2})使用 Case3、 $V_{DS2}=0$ 的式子。Figure 3 中 $V_{DS2(on)}$ 是 MOSFET 的导通电阻和 I_D 引起的电压差，若与 V_{DS} 的 High 电压相比很小的话可视为 0。作为结果，Turn on 时的功率损耗可用下式来近似计算：

$$P_{ton} \approx \frac{1}{2} V_{DS1(on)} I_{D2(on)} t_{on1} f + \frac{1}{6} V_{DS1(on)} (2 I_{D2(on)} + I_{D3(on)}) t_{on2} f \quad (1)$$

同样，也将 Turn off 时的波形分为 2 份，前半部分(t_{off1})使用 Case1、 $V_{DS1}=0$ 的式子。后半部分(t_{off2})使用 Case8、 $I_{D2}=0$ 的式子。Figure 3 的 $V_{DS1(off)}$ 也是前述相同的理由产生的电压，若与 V_{DS} 的 High 电压相比很小的话可视为 0。作为结果，Turn off 时的功率损耗可用下式来近似计算：

$$P_{toff} \approx \frac{1}{6} V_{DS2(off)} (I_{D1(off)} + 2 I_{D2(off)}) t_{off1} f + \frac{1}{2} V_{DS2(off)} I_{D2(off)} t_{off2} f \quad (2)$$

接下来计算的是导通时消耗的功率损耗。Figure 4 所示的是计算导通损耗的波形的一个例子。由于 T_{ON} 区间内 MOSFET 是导通状态， V_{DS} 是 MOSFET 导通电阻与 I_D 的乘积。导通电阻的值请参考 datasheet。选择 Table 2 的波形的形状相近的算式，用近似算式来计算功率损耗。

这个例子使用的是 Table 2 的 Case1。导通损耗可根据下式来计算：

$$P_{ON} \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1(ON)}^2 + I_{D1(ON)} I_{D2(ON)} + I_{D2(ON)}^2) T_{ON} f \quad (3)$$

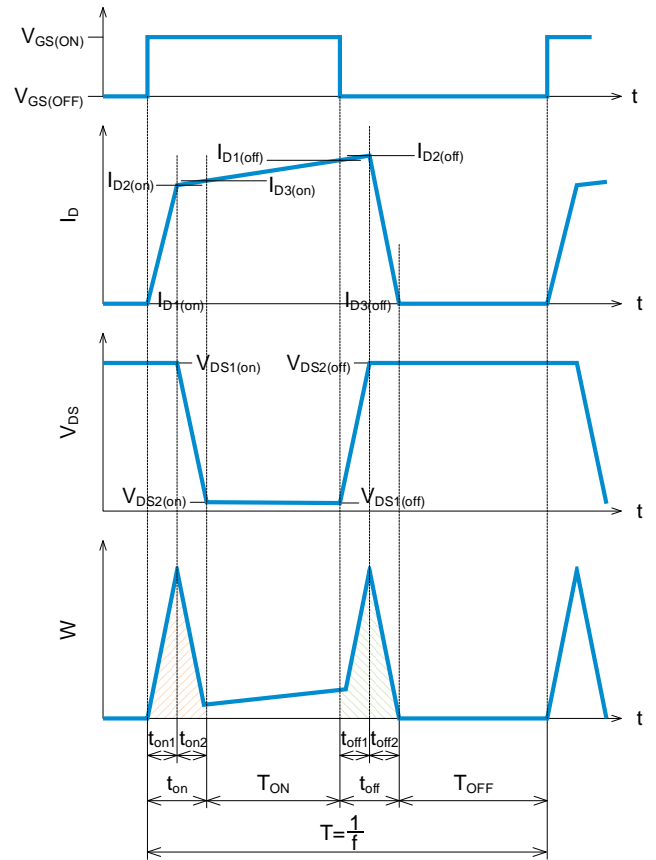


Figure 3. 开关损耗波形的一例

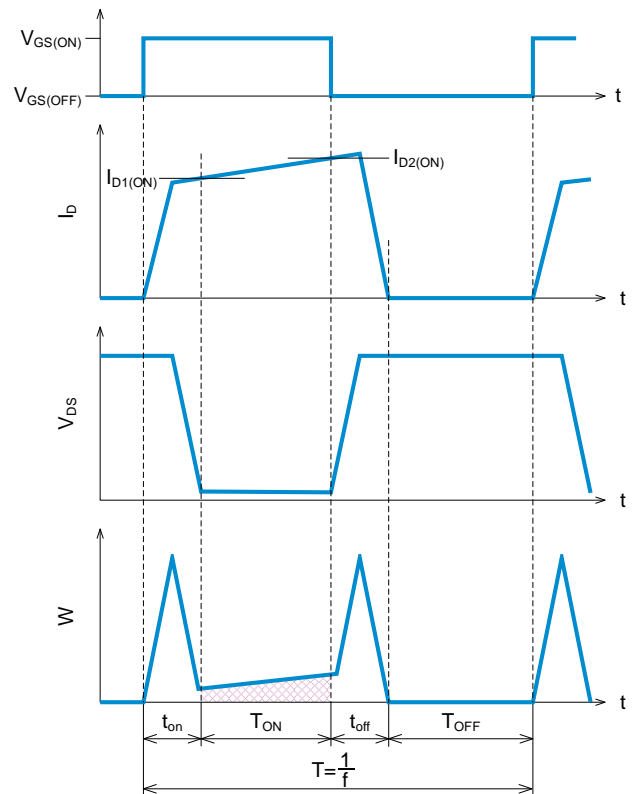


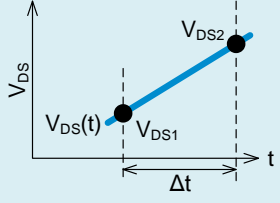
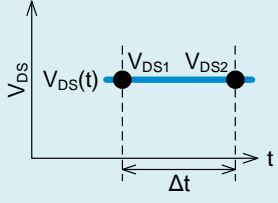
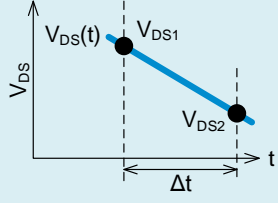
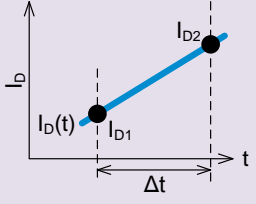
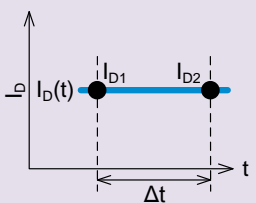
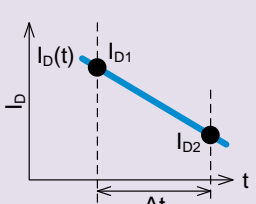
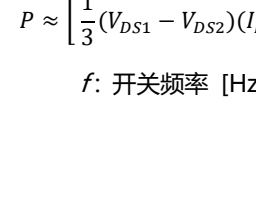
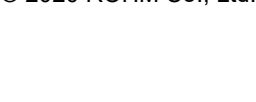
Figure 4. 导通损耗波形的一例

接下来是 MOSFET 在 OFF 时的功率损耗。Figure 4 所示的是 T_{OFF} 的区间，MOSFET 在 OFF 时 I_D 十分小因此功率损耗视为 0。

MOSFET 的功率损耗以上计算出的功率损耗的总和。

$$P_D = P_{ton} + P_{toff} + P_{ON} \quad [W] \quad (4)$$

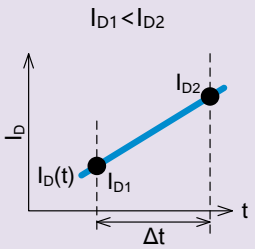
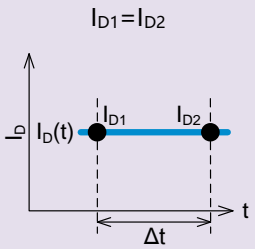
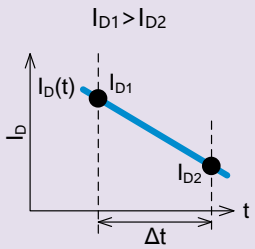
Table 1.各种波形形状所对应的线性近似法的开关损耗计算式

		V _{DS} 随着时间的变化		
I _D 随着时间的变化		V _{DS1} < V _{DS2}	V _{DS1} = V _{DS2}	V _{DS1} > V _{DS2}
I _D 随着时间的变化	I _{D1} < I _{D2}			
	I _{D1} = I _{D2}			
	I _{D1} > I _{D2}			
	Case1 (附录 A 参照)	Case2 (附录 B 参照)	Case3 (附录 C 参照)	
	$P \approx$ 下记式(A)参照 $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$	$P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$ $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$	$P \approx$ 下记式(A) $I_{D1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} \Delta t f$ $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D1} := 0, V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} I_{D2} \Delta t f$	
	Case4 (附录 D 参照)	Case5 (附录 E 参照)	Case6 (附录 F 参照)	
	$P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$ $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$	$P = V_{DS1} I_{D1} \Delta t f \quad (D)$	$P \approx \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f \quad (B)$ $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$	
	Case7 (附录 G 参照)	Case8 (附录 H 参照)	Case9 (附录 I 参照)	
	$P \approx$ 下记式(A) $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$ $V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} (I_{D1} + 2 I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D2} := 0, V_{DS1} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS2} I_{D1} \Delta t f$	$P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f \quad (C)$ $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} \Delta t f$	$P \approx$ 下记式(A) $V_{DS2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} V_{DS1} (2 I_{D1} + I_{D2}) \Delta t f$ $I_{D2} := 0,$ $P \approx \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} \Delta t f$	

$$P \approx \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) (I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} (V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] \Delta t f \quad (A)$$

f: 开关频率 [Hz]

Table 2. 各种波形形状所对应的线性近似法的开关损耗计算式

I _D 随时间的变化		
 <p style="text-align: center;">$I_{D1} < I_{D2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$I_{D1} = I_{D2}$</p>	 <p style="text-align: center;">$I_{D1} > I_{D2}$</p>
Case1 (附录 J 参照)	Case2 (附录 K 参照)	Case3 (附录 L 参照)
$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \quad (E)$	$P = R_{ON} I_{D1}^2 \Delta t f \quad (F)$	$P \approx \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \quad (E)$

R_{ON} : MOSFET 的导通电阻 [Ω]

f : 开关频率 [Hz]

计算示例

根据实测开关波形(Figure 5)计算功率损耗。

Turn on时、导通时和 Turn off时的波形放大分别如 Figure 6、7、8 所示：

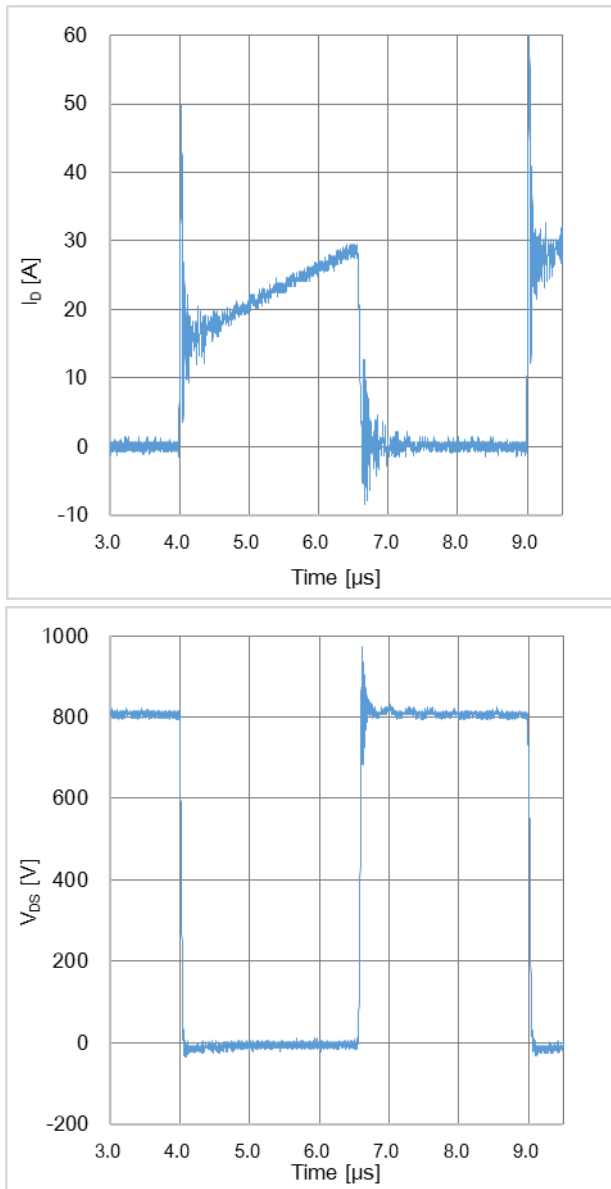


Figure 5. 功率损耗的计算所使用的开关波形
 罗姆制造 SiC MOSFET SCT3040KR
 开关频率 200kHz

Figure 6 是 Turn on 时的波形放大。由于波形中途斜率发生变化，以大致相同的斜率来分割区间，由于波形较为复杂，划分方式会比较主观。读出各个区间的开始电压和电流、结束电压和电流、时间，数值代入 Table 1 的式(A)中求得损耗功率。

Turn on 时的计算例如下面所示，分割为编号 t1~t5 的各个区间。

$$P_{t1} = \left[\frac{1}{3}(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] \Delta t f$$

$$= \left[\frac{1}{3}(800 - 800)(0 - 6.8) - \frac{1}{2} \times 0(800 - 800) - \frac{1}{2} \times 800(0 - 6.8) + 800 \times 0 \right] 7.8n \times 200k = 4.2 [W]$$

$$P_{t2} = \left[\frac{1}{3}(800 - 710)(6.8 - 10.7) - \frac{1}{2} \times 6.8(800 - 710) - \frac{1}{2} \times 800(6.8 - 10.7) + 800 \times 6.8 \right] 4.2n \times 200k = 5.5 [W]$$

$$P_{t3} = \left[\frac{1}{3}(710 - 389)(10.7 - 49.5) - \frac{1}{2} \times 10.7(710 - 389) - \frac{1}{2} \times 710(10.7 - 49.5) + 710 \times 10.7 \right] 24.9 \times 200k = 77.2 [W]$$

$$P_{t4} = \left[\frac{1}{3}(389 - 83)(49.5 - 31.6) - \frac{1}{2} \times 49.5(389 - 83) - \frac{1}{2} \times 389(49.5 - 31.6) + 389 \times 49.5 \right] 13n \times 200k = 26.1 [W]$$

$$P_{t5} = \left[\frac{1}{3}(83 - 18)(31.6 - 8.7) - \frac{1}{2} \times 31.6(83 - 18) - \frac{1}{2} \times 83(31.6 - 8.7) + 83 \times 31.6 \right] 7.9n \times 200k = 1.8 [W]$$

$$P_{ton} = P_{t1} + P_{t2} + P_{t3} + P_{t4} + P_{t5}$$

$$= 4.2 + 5.5 + 77.2 + 26.1 + 1.8$$

$$= 114.8 [W]$$

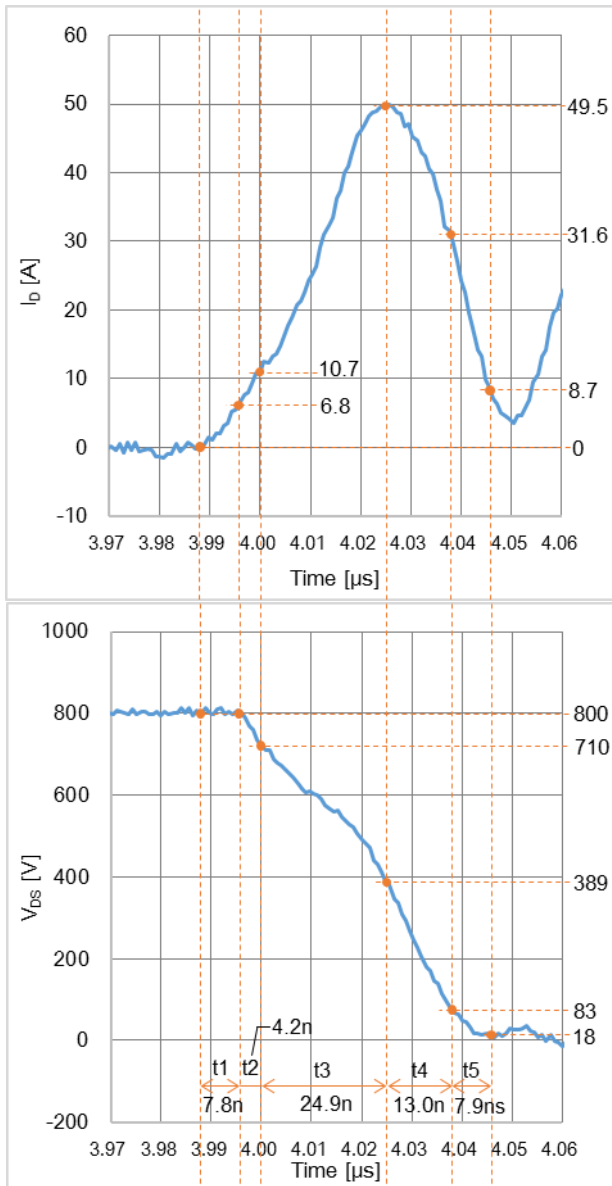


Figure 6. Turn on 的波形放大和各区间的测定值

Figure 7 是导通时的波形放大。这里是代入到 Table 2 的式(E)中计算的损耗功率。MOSFET 的导通电阻使用 datasheet 中的最大值。

$$\begin{aligned}
 P_{ON} &= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) \Delta t f \\
 &= \frac{1}{3} \times 68m(15^2 + 15 \times 28.7 + 28.7^2) 2.49\mu \times 200k \\
 &= 16.7 [W]
 \end{aligned}$$

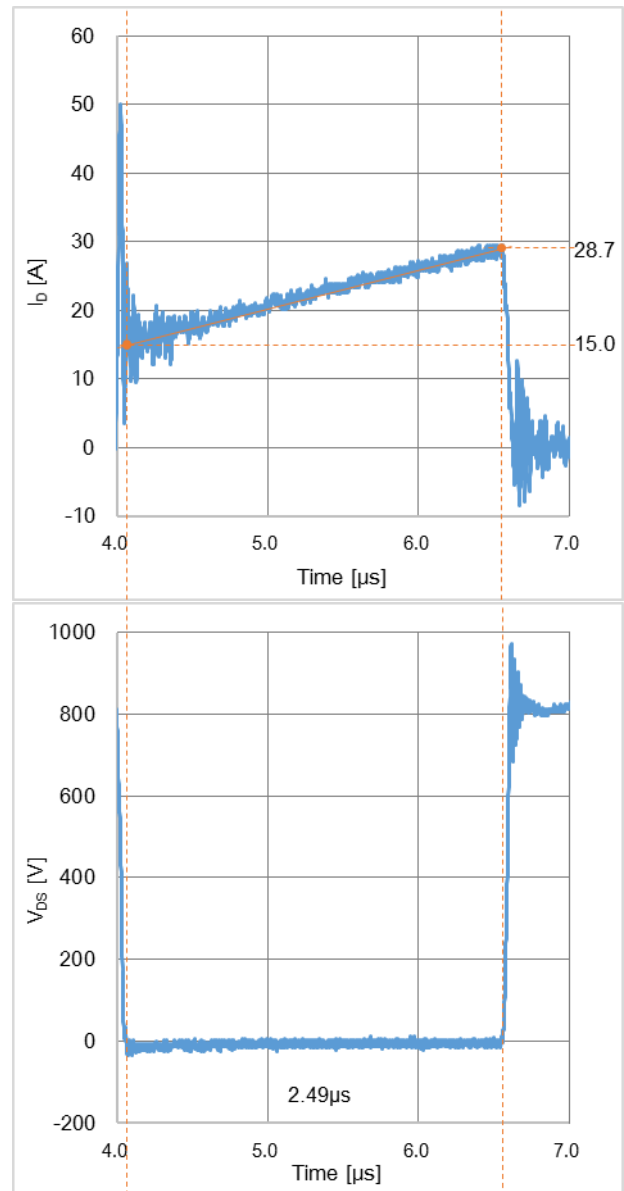


Figure 7. 导通时的波形放大和测定值

Figure 8 是 Turn off 时的波形放大，与 Turn on 时相同的流程来计算。

总功率损耗可用下式求得：

Turn off 时的计算示例如下所示，这里分割为编号 t1~t8 的各区间。

$$\begin{aligned}
 P &= P_{ton} + P_{ON} + P_{toff} \\
 &= 114.8 + 16.7 + 63.8 \\
 &= 195.3 [W]
 \end{aligned}$$

$$P_{t1} = 1.5 [W] \quad P_{t2} = 9.3 [W]$$

$$P_{t3} = 9.9 [W] \quad P_{t4} = 14.6 [W]$$

$$P_{t5} = 7.8 [W] \quad P_{t6} = 7.0 [W]$$

$$P_{t7} = 8.0 [W] \quad P_{t8} = 5.7 [W]$$

$$P_{toff} = 1.5 + 9.3 + 9.9 + 14.6 + 7.8 + 7 + 8 + 5.7 = 63.8 [W]$$

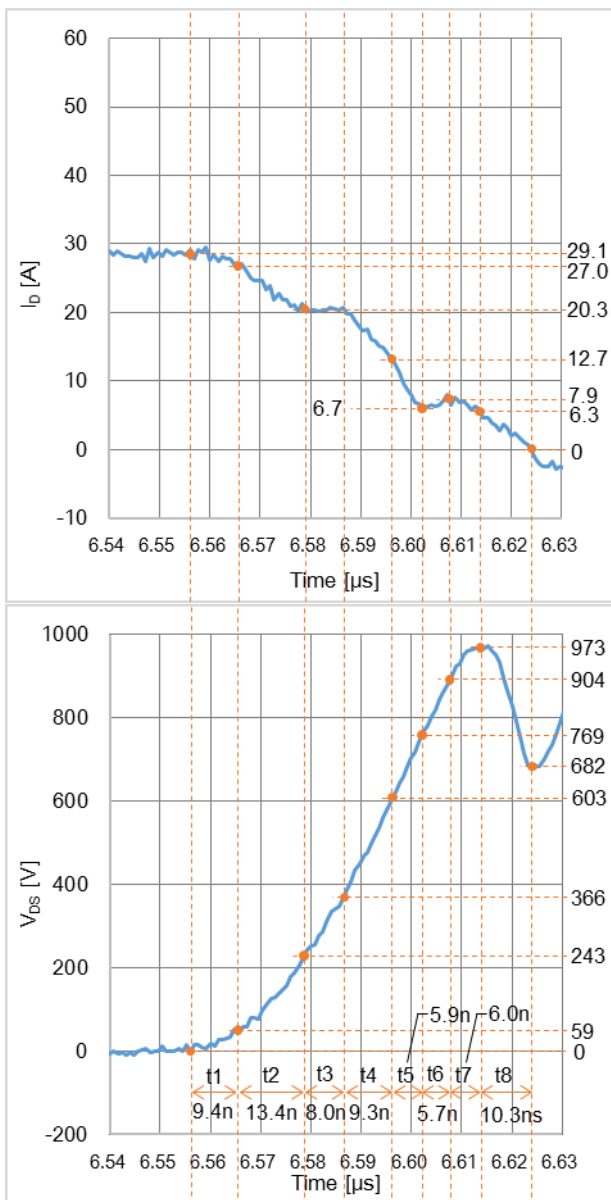


Figure 8. Turn off 的放大波形和各区间的测定值

附录 A

开关损耗计算 (I_D 上升、 V_{DS} 上升的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure A-1 所示:

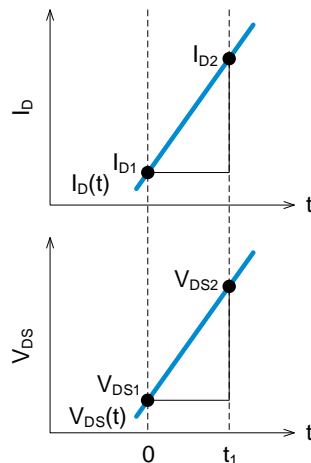


Figure A-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure A-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(A-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (A-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure A-1 的斜率, 表示为式(A-2)(A-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (A-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (A-3)$$

将(A-2)和(A-3)代入到(A-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (A-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (A-5)$$

附录 A (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (A-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (A-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (A-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (A-9)$$

f: 开关频率 [Hz]

在下述条件下计算功率损耗。

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (A-10)$$

将(A-10)代入到(A-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - I_{D2}) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (A-11)$$

$$= \left[-\frac{1}{3} V_{DS2}(I_{D1} - I_{D2}) + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right] t_1 f \quad (A-12)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2}(I_{D1} + 2 I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (A-13)$$

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (A-14)$$

将(A-14)代入到(A-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (A-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(-I_{D2}) + \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \right] t_1 f \quad (A-16)$$

$$= \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (A-17)$$

附录 B

开关损耗计算 (I_D 上升、 V_{DS} 固定的波形时)

对开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 和漏极电流 I_D 使用线性近似法计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure B-1 所示:

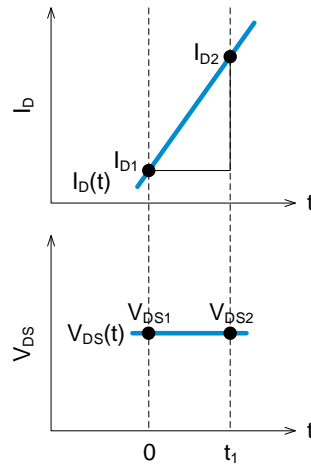


Figure B-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure B-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(B-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (B-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure B-1 的斜率, 表示为式(B-2)(B-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (B-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (B-3)$$

将(B-2)和(B-3)代入到(B-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) (V_{DS1}) dt \quad (B-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t \right) dt \quad (B-5)$$

附录 B (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (B-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (B-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 \right] \quad (B-8)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (B-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (B-10)$$

将(B-10)代入到(B-9)。

$$\underline{P = \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} t_1 f} \quad [W] \quad (B-11)$$

附录 C

开关损耗计算 (I_D 上升、 V_{DS} 降低的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure C-1 所示:

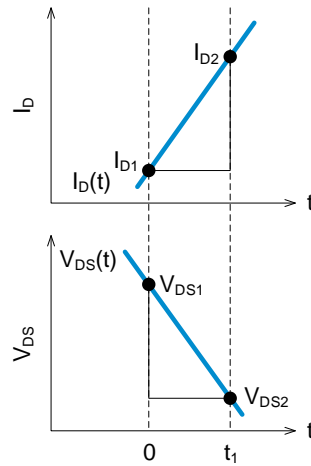


Figure C-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure C-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(C-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (C-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure C-1 的斜率, 表示为式(C-2)(C-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (C-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (C-3)$$

将(C-2)和(C-3)代入到(C-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (C-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (C-5)$$

附录 C (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (C-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (C-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (C-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (C-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{I_{D1} := 0} \quad (C-10)$$

将(C-10)代入到(C-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0 (V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (C-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(-I_{D2}) + \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D2} \right] t_1 f \quad (C-12)$$

$$= \frac{1}{6} (V_{DS1} + 2 V_{DS2}) I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (C-13)$$

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (C-14)$$

将(C-14)代入到(C-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (C-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS1} - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (C-16)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS1}(2 I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (C-17)$$

$$\underline{I_{D1} := 0, V_{DS2} := 0} \quad (C-18)$$

将(C-18)代入到(C-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(0 - I_{D2}) - \frac{1}{2} \times 0 (V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(0 - I_{D2}) + V_{DS1} \times 0 \right] t_1 f \quad (C-19)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(-I_{D2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(-I_{D2}) \right] t_1 f \quad (C-20)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS1} I_{D2} t_1 f \quad [W] \quad (C-21)$$

附录 D

开关损耗计算 (I_D 固定、 V_{DS} 上升的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure D-1 所示:

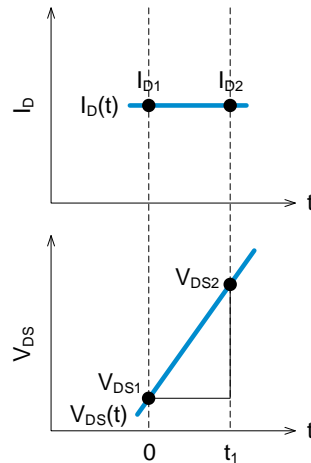


Figure D-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure D-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(D-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (D-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure D-1 的斜率, 表示为式(D-2)(D-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (D-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (D-3)$$

将(D-2)和(D-3)代入到(D-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (D-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t \right) dt \quad (D-5)$$

附录 D (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (D-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (D-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})) t_1 \right] \quad (D-8)$$

$$= \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (D-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (D-10)$$

(D-10)代入到(D-9)。

$$P = \frac{1}{2} (0 + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad (D-11)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS2} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (D-12)$$

附录 E

开关损耗计算 (I_D 固定、 V_{DS} 固定)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure E-1 所示:

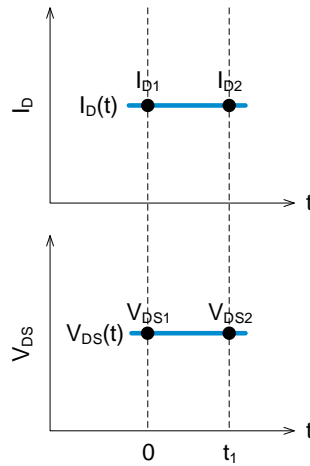


Figure E-1. 区间 $0-t_1$ 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure E-1 所表示的 $0-t_1$ 区间的功率损耗 P 一般使用式(E-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (E-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure E-1 的斜率, 表示为式(E-2)(E-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (E-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (E-3)$$

将(E-2)和(E-3)代入到(E-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} V_{DS1} dt \quad (E-4)$$

根据公式进行积分。

$$P = f [V_{DS1} I_{D1} t]_0^{t_1} \quad (E-5)$$

$$= V_{DS1} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (E-6)$$

附录 F

开关损耗计算 (I_D 固定、 V_{DS} 降低的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure F-1 所示:

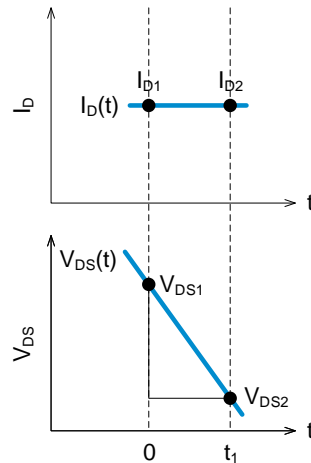


Figure F-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure F-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(F-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (F-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure F-1 的斜率, 表示为式(F-2)(F-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (F-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (F-3)$$

将(F-2)和(F-3)代入到(F-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} I_{D1} \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (F-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t \right) dt \quad (F-5)$$

附录 F (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (F-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (F-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2})) t_1 \right] \quad (F-8)$$

$$= \frac{1}{2} (V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (F-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (F-10)$$

将(F-10)代入到(F-9)。

$$P = \frac{1}{2} (V_{DS1} + 0) I_{D1} t_1 f \quad (F-11)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (F-12)$$

附录 G

开关损耗计算 (I_D 降低、 V_{DS} 上升的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure G-1 所示:

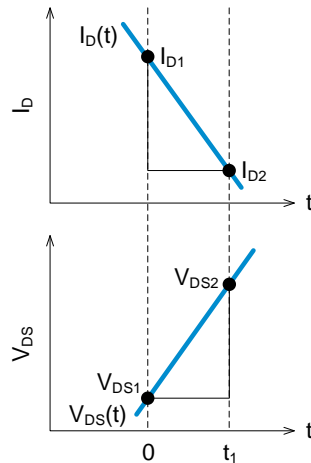


Figure G-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure G-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(G-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (G-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure G-1 的斜率, 表示为式(G-2)(G-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (G-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} + \frac{V_{DS2} - V_{DS1}}{t_1} t = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (G-3)$$

将(G-2)和(G-3)代入到(G-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (G-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (G-5)$$

附录 G (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (G-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (G-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (G-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (G-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (G-10)$$

将(G-10)代入到(G-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - 0) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) I_{D1} - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-12)$$

$$= \frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (G-13)$$

$$\underline{V_{DS1} := 0} \quad (G-14)$$

将(G-14)代入到(G-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - I_{D2}) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-15)$$

$$= \left[-\frac{1}{3} V_{DS2}(I_{D1} - I_{D2}) + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right] t_1 f \quad (G-16)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2}(I_{D1} + 2 I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (G-17)$$

$$\underline{I_{D2} := 0, V_{DS1} := 0} \quad (G-18)$$

将(G-18)代入到(G-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (0 - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(0 - V_{DS2}) - \frac{1}{2} \times 0(I_{D1} - 0) + 0 \times I_{D1} \right] t_1 f \quad (G-19)$$

$$= \left(-\frac{1}{3} V_{DS2} I_{D1} + \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS2} \right) t_1 f \quad (G-20)$$

$$= \frac{1}{6} V_{DS2} I_{D1} t_1 f \quad [W] \quad (G-21)$$

附录 H

开关损耗计算 (I_D 降低、 V_{DS} 固定的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure H-1 所示:

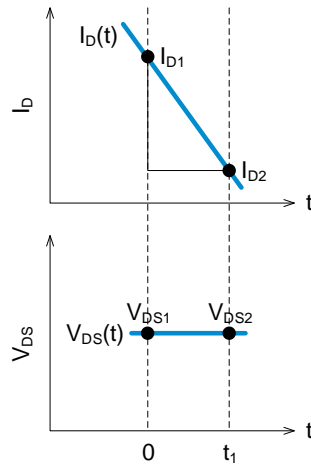


Figure H-1. 区间 0-t₁ 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure H-1 所表示的 0-t₁ 区间的功率损耗 P 一般使用式(H-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (H-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure H-1 的斜率, 表示为式(H-2)(H-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (H-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} \quad (H-3)$$

将(H-2)和(H-3)代入到(H-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) (V_{DS1}) dt \quad (H-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{V_{DS1} (I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t \right) dt \quad (H-5)$$

附录 H (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 \right]_0^{t_1} \quad (H-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 \right] \quad (H-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 \right] \quad (H-8)$$

$$= \frac{1}{2} V_{DS1} (I_{D1} + I_{D2}) t_1 f \quad [W] \quad (H-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (H-10)$$

将(H-10)代入到(H-9)。

$$\underline{P = \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} t_1 f} \quad [W] \quad (H-11)$$

附录 I

开关损耗计算 (I_D 降低、 V_{DS} 降低的波形时)

根据开关波形的漏-源级间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算 Turn on 及 Turn off 时的功率损耗 (开关损耗)。损耗计算所用的波形如 Figure I-1 所示:

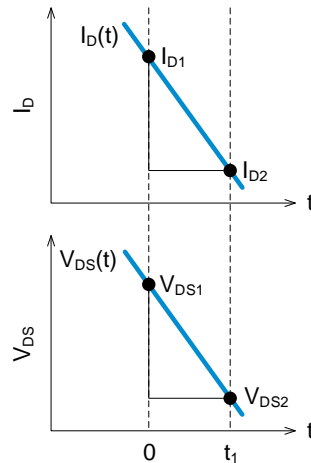


Figure I-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$

Figure I-1 所表示的 0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(I-1)所示的电流电压乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} I_D(t) V_{DS}(t) dt \quad (I-1)$$

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 和 $V_{DS}(t)$ 取决于 Figure I-1 的斜率, 表示为式(I-2)(I-3)。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (I-2)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \quad (I-3)$$

将(I-2)和(I-3)代入到(I-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right) \left(V_{DS1} - \frac{V_{DS1} - V_{DS2}}{t_1} t \right) dt \quad (I-4)$$

$$= f \int_0^{t_1} \left(V_{DS1} I_{D1} - \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t + \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (I-5)$$

附录 I (续)

根据公式进行积分。

$$P = f \left[V_{DS1} I_{D1} t - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (I-6)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} \frac{I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})}{t_1} t_1^2 + \frac{1}{3} \frac{(V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2})}{t_1^2} t_1^3 \right] \quad (I-7)$$

$$= f \left[V_{DS1} I_{D1} t_1 - \frac{1}{2} (I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) + V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2})) t_1 + \frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) t_1 \right] \quad (I-8)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad [W] \quad (I-9)$$

计算下述条件下的功率损耗：

$$\underline{V_{DS2} := 0} \quad (I-10)$$

将(I-10)代入到(I-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - 0)(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - 0) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-11)$$

$$= \left[\frac{1}{3} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) - \frac{1}{2} I_{D1} V_{DS1} - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - I_{D2}) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-12)$$

$$= \underline{\frac{1}{6} V_{DS1}(2 I_{D1} + I_{D2}) t_1 f} \quad [W] \quad (I-13)$$

$$\underline{I_{D2} := 0} \quad (I-14)$$

将(I-14)代入到(I-9)。

$$P = \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2})(I_{D1} - 0) - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1}(I_{D1} - 0) + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-15)$$

$$= \left[\frac{1}{3} (V_{DS1} - V_{DS2}) I_{D1} - \frac{1}{2} I_{D1}(V_{DS1} - V_{DS2}) - \frac{1}{2} V_{DS1} I_{D1} + V_{DS1} I_{D1} \right] t_1 f \quad (I-16)$$

$$= \underline{\frac{1}{6} (2 V_{DS1} + V_{DS2}) I_{D1} t_1 f} \quad [W] \quad (I-17)$$

附录 J

导通时的功率损耗计算 (I_D 上升)

根据 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 和开关波形的漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算导通时(0- t_1)的功率损耗。损耗计算所用的波形如 Figure J-1 所示:

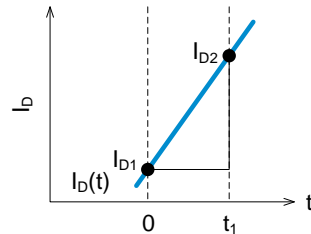


Figure J-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$

Figure J-1 是 0- t_1 区间, 由于 MOSFET 处在导通状态, V_{DS} 是 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 与 I_D 的乘积。

0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(J-1)所示的电阻与电流二次方的乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (J-1)$$

R_{ON} : MOSFET 的导通电阻 [Ω]

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 根据 Figure J-1 的斜率, 如式(J-2)所示。

$$I_D(t) = I_{D1} + \frac{I_{D2} - I_{D1}}{t_1} t = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (J-2)$$

将(J-2)代入到(J-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right)^2 dt \quad (J-3)$$

$$= f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1}^2 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (J-4)$$

根据公式进行积分。

$$P = f R_{ON} \left[I_{D1}^2 t - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (J-5)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t_1^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t_1^3 \right) \quad (J-6)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) t_1 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} t_1 \right) \quad (J-7)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} \right) t_1 \quad (J-8)$$

附录 J (续)

$$P = f R_{ON} \left(I_{D1} I_{D2} + \frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right) t_1 \quad (J-9)$$

$$= f R_{ON} \left(\frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2 - 3 I_{D1}^2 + 3 I_{D1} I_{D2} + 3 I_{D1}^2}{3} \right) t_1 \quad (J-10)$$

$$= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) t_1 f \quad [W] \quad (J-11)$$

附录 K

导通时的功率损耗计算 (I_D 固定)

根据 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 和开关波形的漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算导通时(0- t_1)的功率损耗。损耗计算所用的波形如 Figure K-1 所示:

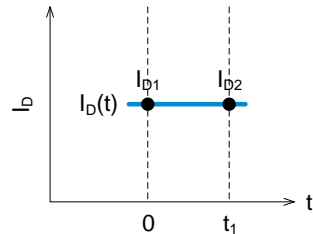


Figure K-1. 区间 0- t_1 的 $I_D(t)$

Figure K-1 是 0- t_1 区间, 由于 MOSFET 处在导通状态 V_{DS} 是 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 与 I_D 的乘积。

0- t_1 区间的功率损耗 P 一般使用式(K-1)所示的电阻与电流二次方的乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (K-1)$$

R_{ON} : MOSFET 的导通电阻 [Ω]

f : 开关频率 [Hz]

此外, $I_D(t)$ 根据 Figure K-1 的斜率, 表示为式(K-2)。

$$I_D(t) = I_{D1} \quad (K-2)$$

将(K-2)代入到(K-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_{D1}^2 dt \quad (K-3)$$

根据公式进行积分。

$$P = f [R_{ON} I_{D1}^2]_0^{t_1} \quad (K-4)$$

$$= R_{ON} I_{D1}^2 t_1 f \quad [W] \quad (K-5)$$

附录 L

导通时的功率损耗计算 (I_D降低)

根据 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 和开关波形的漏极电流 I_D 使用线性近似法来计算导通时(0-t₁)的功率损耗。损耗计算所用的波形如 Figure L-1 所示:

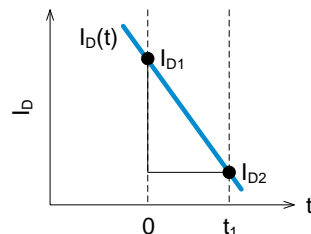


Figure L-1. 区间 0-t₁ 的 I_D(t)

Figure L-1 是 0-t₁ 区间, 由于 MOSFET 处在导通状态 V_{DS} 是 MOSFET 的导通电阻 R_{ON} 与 I_D 的乘积。

0-t₁ 区间的功率损耗 P 一般使用式(L-1)所示的电阻与电流二次方的乘积的积分来计算。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} I_D(t)^2 dt \quad (L-1)$$

R_{ON}: MOSFET 的导通电阻 [Ω]

f: 开关频率 [Hz]

此外 I_D(t)根据 Figure L-1 的斜率, 表示为式(L-2)。

$$I_D(t) = I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \quad (L-2)$$

将(L-2)代入到(L-1)。

$$P = f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1} - \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t \right)^2 dt \quad (L-3)$$

$$= f \int_0^{t_1} R_{ON} \left(I_{D1}^2 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{t_1} t + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{t_1^2} t^2 \right) dt \quad (L-4)$$

根据公式进行积分。

$$P = f R_{ON} \left[I_{D1}^2 t - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t^3 \right]_0^{t_1} \quad (L-5)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - 2 I_{D1} \frac{I_{D1} - I_{D2}}{2 t_1} t_1^2 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3 t_1^2} t_1^3 \right) \quad (L-6)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 t_1 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) t_1 + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} t_1 \right) \quad (L-7)$$

$$= f R_{ON} \left(I_{D1}^2 - I_{D1} (I_{D1} - I_{D2}) + \frac{(I_{D1} - I_{D2})^2}{3} \right) t_1 \quad (L-8)$$

附录 L (续)

$$P = f R_{ON} \left(I_{D1} I_{D2} + \frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2}{3} \right) t_1 \quad (L-9)$$

$$= f R_{ON} \left(\frac{I_{D1}^2 - 2 I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2 - 3 I_{D1}^2 + 3 I_{D1} I_{D2} + 3 I_{D1}^2}{3} \right) t_1 \quad (L-10)$$

$$= \frac{1}{3} R_{ON} (I_{D1}^2 + I_{D1} I_{D2} + I_{D2}^2) t_1 f \quad [W] \quad (L-11)$$

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>