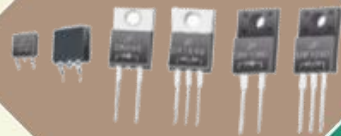




济南晶恒电子
www.jingheng.cn

功率二极管在电源里的 损耗分析和选型原则



简介

张洪亮

- 济南晶恒总工程师
- 山东大学客座教授
- 从事半导体制造业26年



济南晶恒电子

- 半导体分立元器件研发制造商
- 国家定点军工科研单位
- 58年半导体科研和生产历史



济南晶恒二极管系列产品



普通肖特基SKY

Low VF SKY

SIC SKY

光伏SKY

小信号SKY & 开关管

快恢复整流二极管 (FR)

高效整流二极管 (HER)

超快恢复二极管 (SF MUR)

普通整流管 (STD)

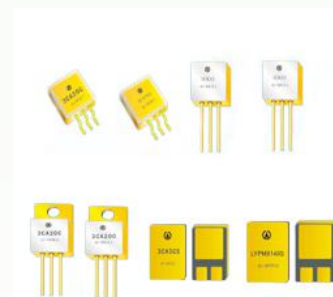


硅双向触发管 (DB3)
高压双向触发管



二极管

特种二极管



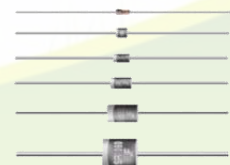
整流桥
肖特基整流桥



稳压管 (ZENER)

瞬变电压抑制二极管 (TVS)

ESD



目录

01

二极管损耗组成

02

二极管损耗分析

03

应用实例1，Flyback电源电路二极管损耗分析

04

应用实例2，BOOST电路二极管损耗分析

05

晶恒二极管在电源效率提升中的应用

01

二极管损耗组成

二极管损耗由以下三部分组成：

1

通态损耗 P_C

2

截止损耗 P_b

3

开关损耗 P_s

$$\text{总损耗 } P_D = P_C + P_b + P_s$$

02

二极管损耗分析

1

通态损耗 P_C

定义：二极管导通状态下产生的损耗。

公式：(1) 若二极管正向电流为直流 I_F ：

$$P_C = I_F \times V_F$$

I_F ：二极管电流

V_F ：二极管正向压降 (@ I_F)

(2) 二极管正向电流为周期脉动直流 $i_F(t)$ ：

设脉动周期为 T ，从图1看出， V_F 是 i_F 的函数，记为： $V_F = f(i_F)$

在一个周期内，二极管的通态损耗为

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T V_F(t) I_F(t) dt$$

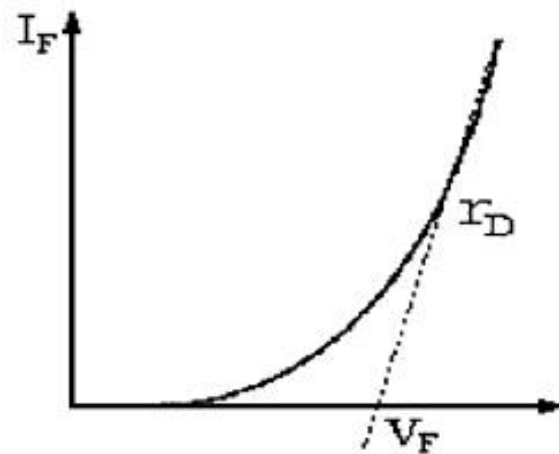


图1 二极管 V_F - I_F 特性

1

通态损耗 P_C

P_C 计算: 以二极管电流 $i_F(t)$ 为周期三角波为例, 计算 P_C 。

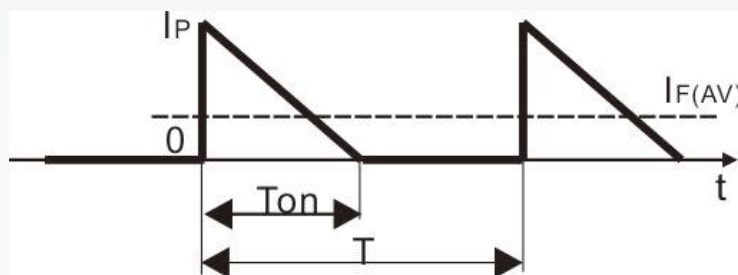


图2 周期三角波

其中： T_{on} ：二极管导通时间

T ：电流周期

I_P ：峰值电流

$I_{F(AV)}$ ：平均电流

规定：占空比 $D = T_{on}/T$

那么， $i_F(t) = I_P(1 - t/t_{on})$ $t = 0 - t_{on}$

$i_F(t) = 0$ $t = t_{on} - T$

下面我们来看看 V_F-I_F 的关系

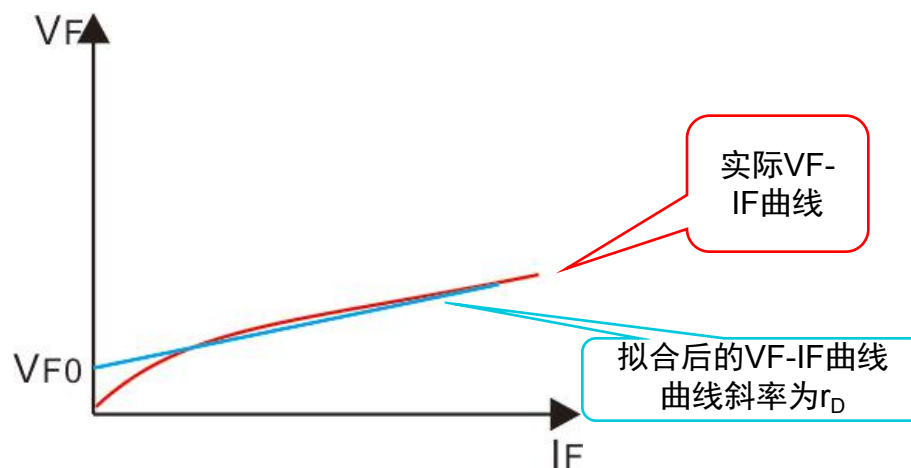


图3 实际二极管 V_F-I_F 特性

如上图的 V_F-I_F 特性，可以把该曲线近似为直线。曲线的斜率为 r_D ，即二极管的动态内阻， V_{F0} 为二极管起始电压。

那么： $V_F(t) = V_{F0} + r_D \times i_F(t)$

二极管在一个周期内的损耗

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{1}{T} \int_0^T V_F(t) i_F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{F0} + r_D i_F) i_F dt \\ &= V_{F0} \times \frac{1}{T} \int_0^T i_F dt + r_D \times \frac{1}{T} \int_0^T (i_F \times i_F) dt \end{aligned}$$

可以看出：

(1) $\frac{1}{T} \int_0^T i_F dt$ 为二极管电流在一个周期内的平均值，记为 $I_{F(AV)}$ ，

把 $i_F(t) = I_P(1-t/t_{on})$ ($t=0-t_{on}$) 代入，

得到： $I_{F(AV)} = 1/2 \times I_P \times D$ 。 $I_{F(AV)}$ 为电源输出电流 I_o 。

(2) $\frac{1}{T} \int_0^T (i_F \times i_F) dt$ 为二极管电流有效值的平方，记为 $I_{F(RMS)}^2$ ，

把 $i_F(t) = I_P(1-t/t_{on})$ ($t=0-t_{on}$) 代入，

得到： $I_{F(RMS)} = I_P \times \sqrt{D/3}$

得出结论，周期三角波的二极管通态损耗公式为：

$$P_C = V_{F0} \times I_{F(AV)} + R_D \times I_{F(RMS)}^2$$

$$I_{F(AV)} = 1/2 \times I_P \times D$$

$$I_{F(RMS)} = I_P \times \sqrt{D/3} = 2I_o/D \times \sqrt{D/3}$$

1

通态损耗 P_C

V_{F0} 、 r_D 的计算举例：

r_D :在电流较大时 ($\geq 1A$) , V_F-I_F 曲线可近似看做为直线。 r_D 一般只有几毫欧到几十毫欧。可以通过 V_F-I_F 曲线近似计算 r_D 。

如：对于晶恒的JF SR5100SL , 5A100V SUPER Low VF SKY DIODE。

各电流下的VF为 , 6A:0.57V , 5A:0.54V , 4A:0.51V , 3A:0.48V ,
2A:0.44V , 1A:0.40V 。

$$r_D = \Delta V_F / \Delta I_F \approx (0.54 - 0.44) / (5 - 2) = 0.033(\Omega) = 33m\Omega$$

V_{F0} : 以 $I_0=3A$, $V_F=0.48V$, 计算

$$V_{F0} = V_F - r_D \times I_0 = 0.48 - 0.033 \times 3 \approx 0.38V$$

由此可见，当输出电流较大时， r_D 的影响还是很大的。

2

截止损耗Pb

定义：二极管反向截止时，由反向漏电流 I_R 和反向截止电压 V_R 引起的损耗。

公式： $P_b = V_R \times I_R$

公式说明：

1) PN结二极管 (FRD、STD类)

常温 (25°C) 时： I_R 基本小于1uA， P_b 很小；

高温 (如：125°C) 时， I_R 也在50uA以下， P_b 最多几十mW。

2) 肖特基二极管

常温 (25°C) 时： I_R 在几十uA，由于 V_R 小 ($\leq 300V$)， P_b 可忽略。

高温时(100°C) 时：常用Si基肖特基二极管 I_R 在几mA-几十mA级，
如：5A40VSKY， $I_R=5mA$ ， $P_b=200mW$ 。 P_b 的影响就大了。

对于 P_b ，关注高温下肖特基类二极管的情况。

3

开关损耗 P_s

定义：二极管执行开和关动作时产生的损耗。由两部分组成，

(1) 是二极管从截止状态到导通状态时的开通损耗 P_{on} ；

(2) 是二极管从导通状态到反向截止状态时的关断损耗 P_{off} 。

而 P_{off} 又由二极管关断时 t_a 反向恢复期间损耗 P_{offa} 和 t_b 反向恢复期间损耗 P_{offb} 两部分组成。

公式： $P_s = P_{on} + P_{off}$
 $= P_{on} + P_{offa} + P_{offb} \approx P_{on} + P_{offb}$

备注：

$$P_{on} = 1/2 \times I_{F(AV)} \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr} / T_s$$

$$P_{offa} = 1/2 \times V_{F(AV)} \times I_{RRM} \times t_a / T_s \quad (\text{通过后面分析, 该项可省略})$$

$$P_{offb} = 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b / T_s$$

各参数定义后续说明。

3

开关损耗 P_s

公式说明：

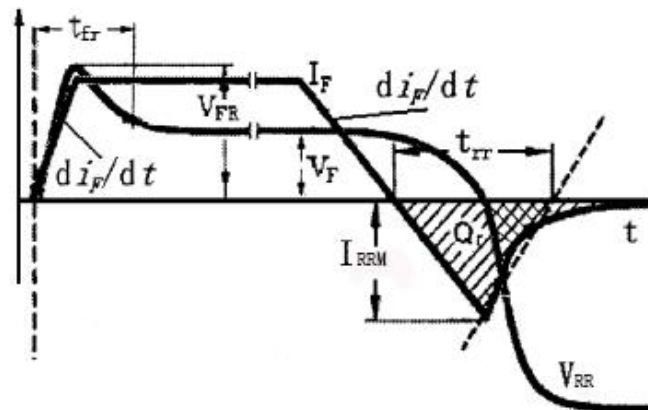


图4 典型二极管开关导通和关断特性

我们由图4的二极管开关特性来推导**开通**和**关断**损耗。

备注：

t_{fr} ：正向电压恢复时间

V_{FR} ：正向恢复最大电压

V_F ：平均电流下的正向压降

di_F/dt ：在开通和关断时的电流变化率
(由外电路决定，假设相等)

t_{tr} ：反向恢复时间

I_{RRM} ：最大反向恢复电流

V_{RR} ：反向恢复电压

Q_{rr} ：存储电荷

1

开通损耗Pon

把图2，开通过程的电流和电压波形进行理想化处理，得到图3的波形。

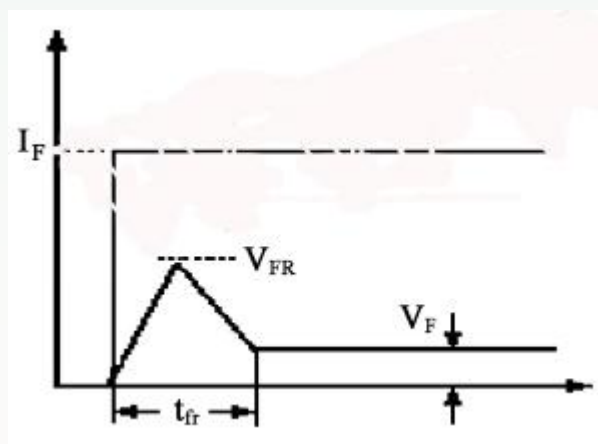


图3 二极管开通时电压和电流理想波形

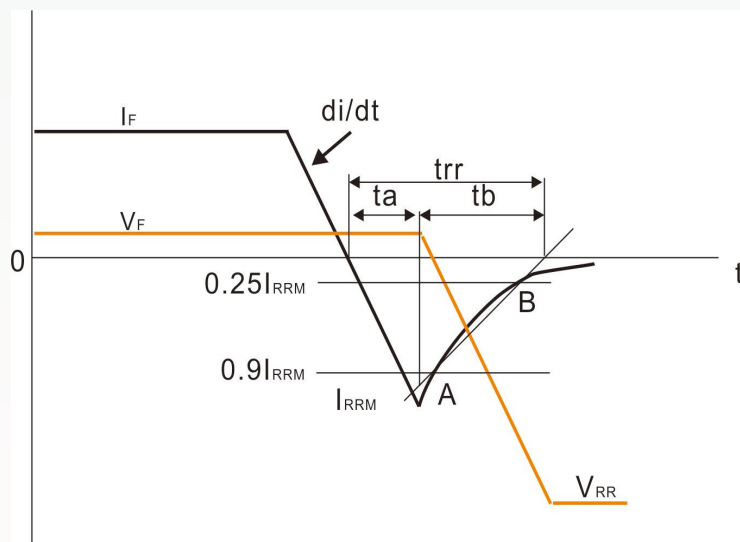
$$P_{on} = \frac{1}{2} \times I_F \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr} / T_s$$

其中， T_s 为主开关管开关周期。

2

关断损耗 P_{off}

把图2的关断时刻电流和电压波形理想化处理，得到图4的波形。



t_a ：电流过零点到最大反向电流 I_{RRM} 的时间。扫描存储电荷的时间。

t_b ：从 I_{RRM} 到经过 $0.9I_{RRM}$ (A点)与 $0.25I_{RRM}$ (B点)两点的直线与电流为零直线的交点直接所对应的时间。

V_{RR} ：反向恢复电压。

t_b/t_a ：软度因子。反映二极管反向恢复特性的软硬程度。

图4 二极管关断特性

假设：

在 t_a 阶段反向电流 I_R 线性增加，最大值为 I_{RRM} ；

在 t_b 期间 I_R 线性减小到零，二极管上电压在 t_b 时刻才开始线性上升，最大值为 V_{RR} 。

t_a 期间的损耗（一个周期）为：

$$P_{offa} = \frac{V_F}{T} \int_0^{t_b} i_R dt = 1/2 \times V_F \times I_{RRM} \times t_a / T_s$$

t_b 期间的损耗计算（一个周期）为：

$$P_{offb} = \frac{1}{T} \int_0^{t_b} i_R(t) V_R(t) dt = 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b / T_s$$

注：对于 t_a 期间损耗 P_{offa} ，由于 t_a/T_s 在0.005左右， $V_F/2$ 在1V以下， I_{RRM} 在几A到十几A，损耗一般在10mW以内，所以，关断损耗只计算 t_b 期间的 P_{offb} 。

3

开关损耗 P_s 的计算

开关损耗 P_s 等于开通损耗 P_{on} 和关断损耗 P_{off} 的和。

$$P_s = P_{on} + P_{off}$$

$$P_s = 1/2 \times I_F \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr} / T_s + 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b / T_s$$

列举一个例子，同样一台开关电源，选取不同种类的二极管，开关损耗哪个更小呢？让我们来计算一下吧！

3

开关损耗 P_s 的计算

某开关电源规格为24V 3A。电源开关频率为50KHz ($T_s=20000\text{ns}$) ,
二极管反向电压 V_{RR} 为120V。

方案A：输出整流管使用晶恒快恢复二极管JF MUR1020 (10A200V)

MUR1060参数： $t_{fr}=50\text{ns}$, $t_b=50\text{ns}$, $V_F=0.9\text{V}$, $I_{RRM}=5\text{A}$

经计算：
 $t_{fr}/T_s=0.0025$,
 $t_b/T_s=0.0025$,
 V_{FR} 为5倍的 V_F ,
 $V_{FR}-V_F=3.6\text{V}$

得出：
 $P_{on}=13.5\text{mW}$
 $P_{off}= 375\text{mW}$
总开关损耗 $P_s=388.5\text{mW}$

3

开关损耗 P_s 的计算

方案B · 输出整流管为晶恒肖特基SKY二极管，JF SR10200 (10A200V)

JF SR10200参数： $t_{fr}=20ns$ ， $t_b=20ns$ ， $I_{RRM}=1A$ ， $V_F=0.8V$

经计算： $t_{fr}/T_s=0.0025$ ，

$t_b/T_s=0.001$ ，

V_{FR} 为5倍的 V_F ，

$V_{FR}-V_F=3.2V$

得出： $P_{on}=4.8mW$

$P_{off}=30mW$

总开关损耗 $P_s=39.6mW$

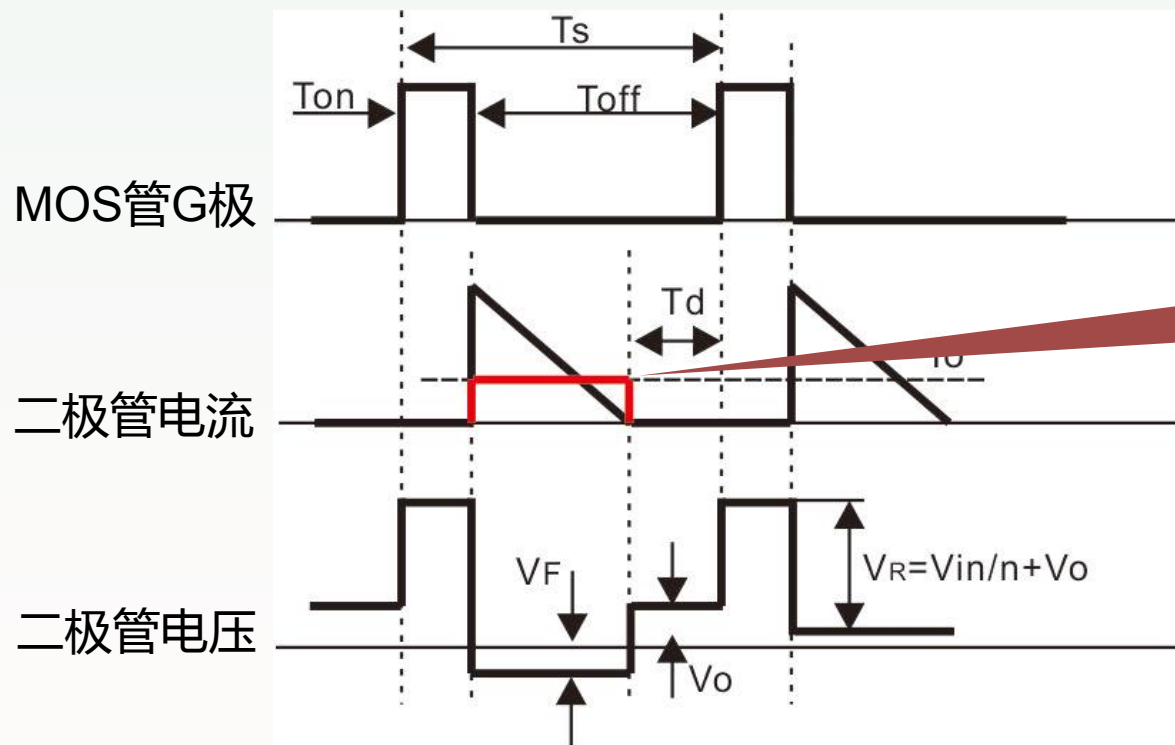
结论：对于开关损耗 P_s ，肖特基二极管比快恢复二极管小的多。

03

应用实例1

Flyback电源二极管损耗分析 (DCM模式)

DCM模式下二极管损耗分析



平均电流，
计算使用。

图7 Flyback电源DCM时的二次侧二极管的电压、电流波形

DCM模式时二极管损耗计算

根据图7，结合前面的二极管损耗分析，可得到该模式下的二极管损耗计算公式：

1) **通态损耗**： $P_C = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2$

备注

I_O ：电源输出电流

$I_{F(RMS)}$ ：二极管电流有效值

V_{F0} ：起始正向压降

r_D ：动态电阻

该三角波的占空比 $D1 = (T_{off} - T_d) / T_s$

电流有效值 $I_{F(RMS)} = 2I_O / D1 \times \sqrt{D1/3} \approx 1.15I_O \times \sqrt{1/D1}$

2) **截止损耗** : $P_b = V_R \times I_R(@V_R) \times T_{on}/T_s + V_o \times I_R(@V_o) \times T_d/T_s$

备注

V_R : 二极管工作时实际反向电压

$I_R(@V_R)$: V_R 时的反向漏电流。

T_{on} : 电源开关管导通时间

T_s : 电源开关周期

V_o : 电源输出电压

$I_R(@V_o)$: V_o 时的反向漏电流。

T_d : 死区时间

3) **开关损耗** : $P_s = P_{on} + P_{off}$

$$= 1/2 \times I_p \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr}/T_s + 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b/T_s$$

备注

I_p : 二极管峰值电流

V_F : I_o 电流下的正向压降

t_{fr} : 正向电压恢复时间

T_s : 电源开关周期

V_{FR} : 正向恢复最大电压

V_{RR} : 反向恢复电压

I_{RRM} : 最大反向恢复电流

t_b : 反向恢复时间 t_b 部分

4) **二极管总损耗** : $P_D = P_c + P_b + P_s$

举例1：（ 5V低电压输出，输出整流管使用晶恒肖特基二极管 ）

开关电源规格为5V 2A，工作于DCM模式，开关频率50KHz。输出整流二极管使用晶恒肖特基二极管 JF SR540（ 5A 40V ）。

1) 电路工作条件

$$V_O=5V, I_O=2A, T_s=20000ns, T_{on}/T_s=0.3, T_d/T_s=0.2,$$

$$D1=(T_{off}-T_d)/T_s=0.5, V_R=32V, V_{RR}=V_O=5V, r_D=30m\Omega$$

$$I_{F(RMS)} \approx 1.15 I_O \times \sqrt{1/D1} = 3.25A$$

$$I_p=2I_O/D1=8A$$

2) 二极管参数（ 假设二极管 $T_J=100^\circ C$ ）：

$$V_{F0}=0.43V, I_R (@V_R)=2mA, I_R (@V_O)=0.5mA$$

$$t_{fr}=20ns, V_{FR}=5V_F, t_b=20ns, I_{RRM}=1A$$

3) 损耗计算（ $T_J=100^\circ C$ ）

$$P_c = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2 = 860mW + 97.5mW = 957.5mW$$

$$\begin{aligned} P_b &= V_R \times I_R (@V_R) \times T_{on}/T_s + V_O \times I_R (@V_O) \times T_d/T_s \\ &= 19.2 + 0.75 = 19.95mW. \end{aligned}$$

$$P_s = P_{on} + P_{off}$$

$$\begin{aligned} &= 1/2 \times I_p \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr}/T_s + 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b/T_s \\ &= 6.88 + 1.25 = 8.13mW \end{aligned}$$

$$\text{总损耗 } P_D \approx 980mW$$

下面再计算二极管 $T_J=125^{\circ}\text{C}$ 时的损耗，看看总损耗的变化。通过以上计算可知， P_s 很小，为简化计算，不再计算。

二极管 $T_J=125^{\circ}\text{C}$ 时参数为：

$$V_F=0.41\text{V}, V_R=32\text{V}, I_R (@V_R)=10\text{mA}, I_R (@V_o) = 2.5\text{mA}$$

经计算：

$$P_c=917.5\text{mW}$$

$$P_b=96+2.5=98.5\text{mW}$$

$$\text{总损耗 } P_D=1016\text{mW}$$



总损耗上升

由此可见：

01

DCM模式下，二极管的损耗主要来自通态损耗。使用肖特基二极管，开关损耗可以忽略不计。截止损耗的第二项也可忽略不计。

02

结温低时，截止损耗 P_b 影响不大。

03

随着结温的升高， P_b 上升量超过了 P_c 下降量，总损耗上升。若二极管散热不及时，容易造成热失控。

举例2：（24V高电压输出，整流管使用晶恒 快恢复二极管或肖特基二极管）

开关电源规格为24V 1A，工作在DCM模式，开关频率50KHz。

电路工作条件： $V_O=24V$ ， $I_O=1A$ ， $T_{on}/T_s=0.25$ ， $D1=(T_{off}-T_d)/T_s=0.5$ ，
 $T_d/T_s=0.25$ ， $T_s=20000ns$ ， $V_R=120V$ ， $V_{RR}=V_O=24V$

A：输出整流管为晶恒 **快恢复二极管 JF HER304**（5A300V50ns）

A1：HER304参数（假设二极管 $T_j=100^\circ C$ ）

$$V_F=0.90V, I_R (@V_R)=10\mu A, I_R (@V_{RR})=2\mu A$$

$$t_{fr}=50ns, V_{FR}=5V_F, t_b=50ns, I_{rrm}=2A$$

$$r_D=50m\Omega, I_{F(RMS)}=1.15I_O\sqrt{1/D1}=1.63A$$

A2：损耗计算

$$P_c=V_{F0}\times I_O+r_D\times I_{F(RMS)}^2=0.9+0.13=1.03W\approx 1000mW$$

$$P_b=V_R\times I_R(@V_R)\times T_{on}/T_s+V_O\times I_R(@V_O)\times T_d/T_s$$

$$=120\times 10\times 10^{-6}\times 0.25+24\times 2\times 10^{-6}\times 0.25$$

$$=0.312mW$$

$$P_s=P_{on}+P_{off}=1/2\times I_p\times (V_{FR}-V_F)\times t_{fr}/T_s+1/4\times V_{RR}\times I_{RRM}\times t_b/T_s$$

$$=1/2\times 1\times 4\times 0.0025+1/4\times 24\times 2\times 0.0025$$

$$=35mW$$

$$\text{总损耗 } P=P_c+P_b+P_s\approx 1035mW$$

结论：快恢复管的损耗也主要来自通态损耗 P_c 。DCM模式下，开关损耗很小。

B： 输出整流管为晶恒肖特基二极管 JF SR3200 (3A 200V)

B1： SR3200参数 (假设二极管 $T_J=100^{\circ}\text{C}$)

$$V_F=0.72\text{ V} , I_R (@V_R)=0.5\text{mA} , I_R (@V_O)=0.1\text{mA}$$

$$r_D=80\text{m}\Omega , I_{F(\text{RMS})}=1.63\text{A}$$

B2： 损耗计算 $P_c=V_F \times I_O + r_D \times I_{F(\text{RMS})}^2 \approx 720\text{mW} + 213\text{mW} = 933\text{mW}$

$$P_b=V_R \times I_R (@V_R) \times T_{\text{on}}/T_s + V_O \times I_R (@V_O) \times T_d/T_s$$

$$=15+0.6=15.6\text{mW}$$

对于 P_s , 参考举例1 , 数值很小 , 不再计算。

$$\text{总损耗 } P=P_c+P_b+P_s \approx 949\text{mW}$$

结论：同样规格电源，使用肖特基二极管的损耗比快恢复二极管的损耗低。

DCM二极管损耗分析总结

01

肖特基 快恢复二极管的损耗主要来自 P_c 。

02

满足设计条件下，尽量选用 V_F 低的二极管。如肖特基二极管。

03

对肖特基二极管，高温时的截止损耗 P_b 虽然值不高，但上升速度超过通态损耗 P_c ，总损耗 P_D 上升，能造成热失控。

04

对快恢复二极管，DCM模式下，开关损耗很小。

DCM二极管损耗计算公式

A：肖特基二极管

$$P_C = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2$$

$$P_b = V_R \times I_R (@V_R) \times T_{on} / T_s$$

$$P_D = P_C + P_b$$

B：快恢复二极管

$$P_C = V_F \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2$$

$$P_s = 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b / T_s \text{ (必要时)}$$

$$P_D = P_C + P_s$$

04

应用实例2

BOOST电路二极管损耗分析

BOOST电路二极管损耗分析

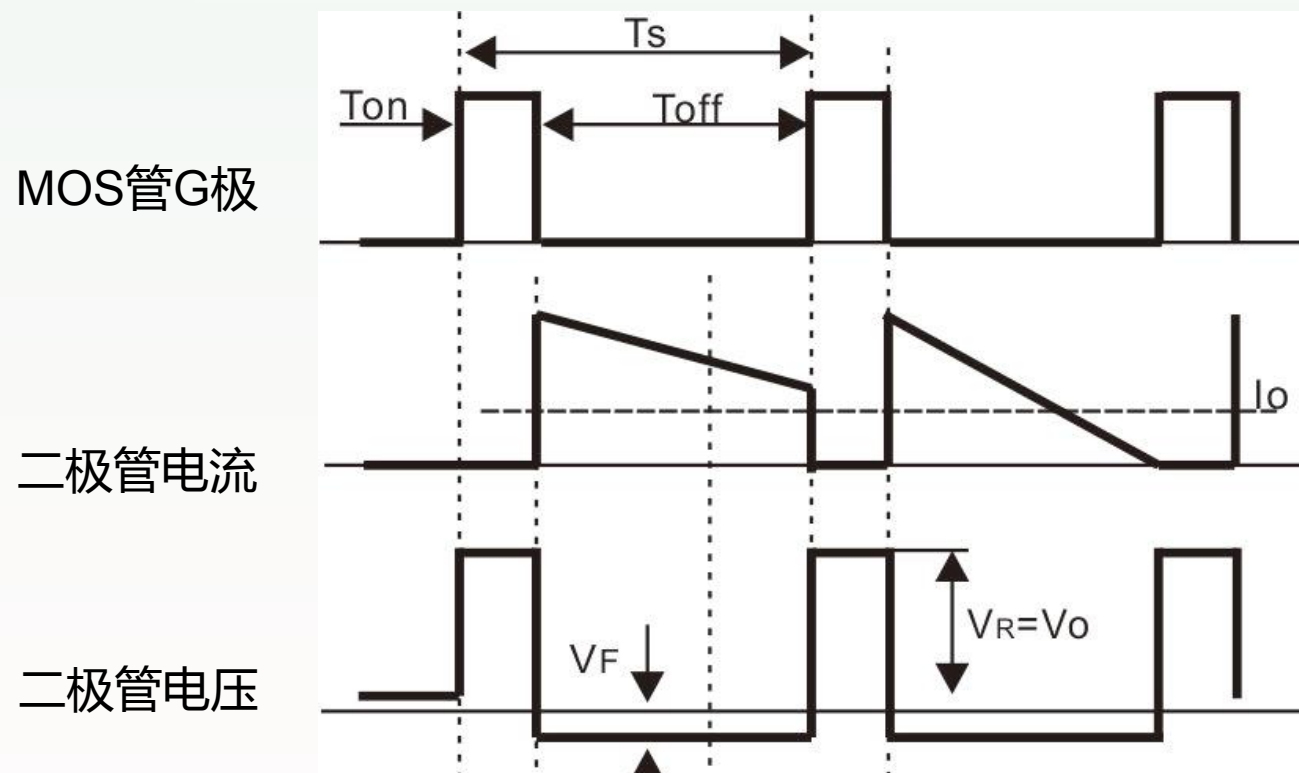


图6 BOOST电路（临界模式）二极管的电压、电流波形

BOOST电路二极管损耗计算

以BOOST电路输出电压较高（如PFC电路）、输出功率较大的场合为例。

输出二极管为超快恢复二极管或SIC肖特基二极管。由于二极管在关断时要承受高反压（ $=V_o$ ），开通时有较大的浪涌电流，开关损耗 P_s 计算公式先把 P_{on} 和 P_{offb} 考虑进来。该电路里，二极管反向恢复电压始终等于 V_o 。为便于计算，我们把二极管电流设定为平均电流即输出电流 I_o 。

参考上面的波形图，先得到：

$$\text{通态损耗 } P_C = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_F^2(\text{RMS})$$

$$\text{截止损耗 } P_b = V_R \times I_R(@V_R) \times T_{on}/T_s$$

$$\text{开关损耗 } P_s = P_{on} + P_{off} = P_{on} + P_{offb}$$

$$= 1/2 \times I_F \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr}/T_s + 1/4 \times V_O \times I_{RRM} \times t_b/T_s$$

注1：二极管电流波形为周期梯形波，其平均值即为电源输出电流 I_o 。

该三角波的占空比 $D1 = T_{off}/T_s$

$$\text{电流有效值 } I_{F(\text{RMS})} = I_o \times \sqrt{1/D1}$$

注2：由于 $P_{offa} = 1/2 \times V_F \times I_{rrm} \times t_a/T_s$ ，公式里 V_F 比 P_{offb} 里的 V_o 差200多倍，去掉系数和 t_a 、 t_b 长短的差异，也有近100倍的差异。所以，忽略掉 P_{offa} 是可以的。

BOOST电路二极管损耗计算

举例1：

A：假设一电源，输入电压 $V_{in}=310VDC$ ，输出电压 $V_o=381V$ ，输出电流 $I_o=5A$ 。开关频率 $50KHz$ ，开关周期 $T_s=20000ns$ 。占空比 $D=T_{on}/T_s=1-V_{in}/V_o=0.186$ ， $D1=1-D=0.814$ 。

假设二极管的开通时的电流上升率(di/dt)和关断时的电流下降率(di/dt)都设为 $500A/\mu s$ 。

B：输出二极管使用晶恒公司的快恢复二极管MUR1560 (15A 600V)。

参数为： $V_{F0}=1.3V$ ， $I_R (@381V)=10\mu A$ ；

$t_{fr}=150ns$ ， $V_{FR}=16V$ ， $I_{RRM}=13A$ ， $t_b=50ns$ ，

$t_{fr}/T_s=0.0075$ ， $t_b/T_s=0.002$ ， $r_D=50m\Omega$

$I_{F(RMS)}=I_o \times \sqrt{1/D1} \approx 5 \times 1.1=5.5A$

C：损耗计算

通态损耗 $P_c=V_{F0} \times I_o + r_D \times I_{F(RMS)}^2 \approx 1.3 \times 5 + 0.05 \times 5.5^2 = 6.5 + 1.5 = 8.0 (W)$

截止损耗 $P_b=V_R \times I_R (@V_R) \times T_{on}/T_s = 381 \times 10 \times 10^{-6} \times 0.186 = 7.08 \times 10^{-6}(W)$ (忽略不计)

开关损耗 $P_s=P_{on}+P_{offb}$

$P_{on}=1/2 \times I_F \times (V_{FR}-V_F) \times t_{fr}/T_s = 1/2 \times 5 \times 14.3 \times 0.0075 = 0.27W$

$P_{offb}=1/4 \times V_o \times I_{RRM} \times t_b/T_s = 1/4 \times 381 \times 13 \times 0.0025 = 3.09W$

$P_s=P_{on}+P_{offb}=3.36W$

总损耗 $P_D=P_c+P_s=11.36W$

结论： 1. 对于快恢复二极管，损耗只计算 P_c 和 P_{offb} 即可。
2. 开关损耗比较大。

提示：

快恢复二极管的 V_F 、 V_{FR} 、 t_{fr} 、 $t_{rr}(t_b)$ 、 I_{RRM} 随着不同的工作条件是变化的。计算二极管损耗时要确定正向电流 I_F 、反向恢复电压 V_{RR} 、二极管电流变化率 di/dt ，二极管的实际结温 T_{VJ} 。

1

t_{rr} 随着 I_F 、 V_{RR} 、 T_{VJ} 的增加而增加，随着 di/dt 的增加而减小

2

I_{RRM} 随着 I_F 、 T_{VJ} 、 V_{RR} 、 di/dt 的增加而增加

3

V_F 随着 T_{VJ} 的上升而减小

4

V_{FR} 随着 di/dt 的增加而增加

5

t_{fr} 随着 di/dt 的增加而减小。

举例2：

A：电源条件同举例1。

B：输出二极管使用晶恒SIC肖特基SC1512。

$$V_{F0} = 1.2V, I_R (@381V) = 10\mu A;$$

$$t_{fr} = 150ns, V_{FR} = 6.0V, I_{RRM} = 2A, t_b = 25ns$$

$$t_{fr}/T_s = 0.0075, t_b/T_s = 0.00125$$

$$r_D = 50m\Omega$$

C：损耗计算 通态损耗 $P_c = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_F^2 (RMS) = 1.2 \times 5 + 0.05 \times 5.5^2 \approx 7.5W$

截止损耗参考举例1，忽略

$$\text{开关损耗 } P_s = P_{on} + P_{offb}$$

$$P_{on} = 1/2 \times I_F \times (V_{FR} - V_F) \times t_{fr}/T_s = 1/2 \times 5 \times 6.5 \times 0.0075 \approx 0.09W$$

$$P_{offb} = 1/4 \times V_O \times I_{RRM} \times t_b/T_s = 1/4 \times 381 \times 2 \times 0.00125 \approx 0.24W$$

$$P_s = P_{on} + P_{offb} = 0.33W。$$

$$\text{总损耗 } P_D = P_c + P_b = 7.83W$$

- 结论：
1. SIC肖特基的损耗小于快恢复二极管的损耗。
 2. 对于SIC肖特基二极管，损耗只计算 P_c 。

高压BOOST电路二极管损耗分析总结

01

SIC肖特基二极管的损耗主要来自 P_c 。

02

快恢复二极管的损耗主要来自 P_c 和 P_s 里面的 P_{offb} 。

03

满足设计条件下，尽量选用SIC肖特基二极管。

04

尽量选用 V_F 低的二极管。

05

对快恢复二极管，要减小 P_s ，可选择 t_{rr} 短， I_{RRM} 小的软恢复产品。

BOOST二极管损耗计算公式

A : 快恢复二极管

$$P_C = V_F \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2$$

$$P_S = 1/4 \times V_{RR} \times I_{RRM} \times t_b / T_s$$

$$P_D = P_C + P_S$$

B : SIC肖特基二极管

$$P_C = V_{F0} \times I_O + r_D \times I_{F(RMS)}^2$$

$$P_D = P_C$$

二极管的选用原则

01

二极管的总损耗主要来自通态损耗和开关损耗。

02

肖特基二极管的通态损耗和开关损耗都优于快恢复二极管，优先选择。

03

当温度高时（ 100°C ），肖特基二极管的截止损耗的影响必须考虑。

04

对于快恢复二极管，要降低开关损耗，应选择 t_{rr} 小的，但 t_{rr} 小， V_F 就增加，所以，对损耗的影响，要折中考虑。一般对于几十KHZ的电源，HER（75ns）的产品就可以了。

举例：

一单端反激开关电源20V，1.5A。输出整流二极管分别使用SKY SR5200和SR5250，快恢复二极管HER504G和SF56G，考察转换效率。

Item	Type	VF@1.5A(V)	trr(ns)	Pin(W)	Pout(W)	Efficiency(%)
SR5200	SKY	0.70	/	35.7	30	84.00%
SR5250	SKY	0.742	/	35.9		83.60%
HER504G	FRD	0.748	75	36		83.30%
SF56G	UFRD	0.89	35	36.3		82.60%

测试结果符合前面的计算结论。

05

晶恒二极管在电源效率提升中的应用

因为肖特基二极管(SKY) 是输出整流最为理想的首选器件，而晶恒电子又素以生产肖特基二极管闻名，接下来让我们探讨一下晶恒二极管在电源效率提升中的应用。

晶恒是国内最早研制和批量生产肖特基芯片和成品的公司之一，早在上世纪70年代，就研制出了国内第一支肖特基二极管，90年代初，开始批量生产民用肖特基芯片和成品。是军用肖特基产品定点单位。



肖特基二极管系列

普通肖特基
二极管

超低VF肖特
基二极管

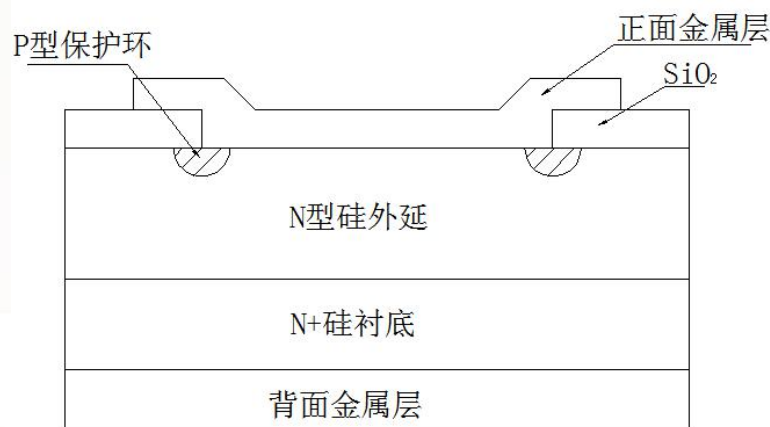
SIC肖特基
二极管

1. 普通肖特基二极管

芯片特点:

- 1 半导体-金属势垒EPI结构，**低压采用Mo势垒，高压采用Pt-Au势垒。**
- 2 单载流子（电子）导电，没有存储电荷复合效应，开关速度快。
- 3 P型保护环结构
- 4 低IR、低VF
- 5 高结温
- 6 高抗ESD和R/C能力
- 7 低成本，高可靠，一般应用。
- 8 芯片全部在宇航级生产线上制造

无法解决VF和IR的互换问题。



1. 普通肖特基二极管

制造:



采用环保、高端封装树脂

成品管100%过回流焊

芯片批100%抽样高温检测

无卤产品100%批次检测

1. 普通肖特基二极管

电流: 0.5A--60A **电压:** 20V--250V

轴向

R-1, DO-41, DO-15, DO-201AD, R-6



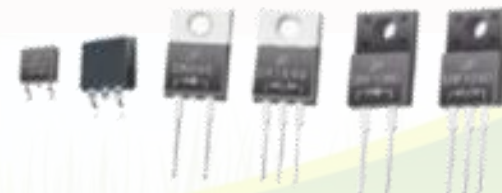
贴片

SOD123, SOD123FL, SMA, SMB, SMC, T0277
SMAFL, SMBFL, SMCFL, T0263, T0252等



大功率

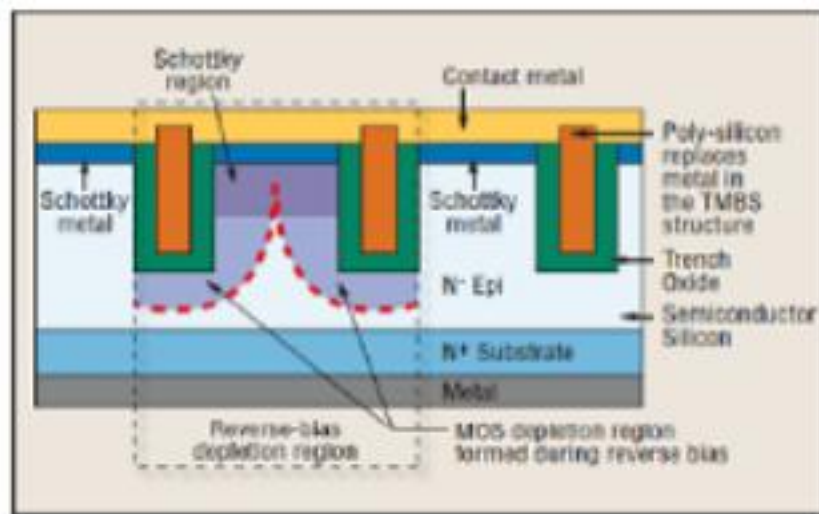
T0220AC, T0220AB, T0252, T0263
IT0220AC, IT0220AB, T0-247



2. 超低VF肖特基二极管

产品特点：芯片

- 1 Trench（深沟槽）技术，解决了VF和IR互换问题。
- 2 超低VF
- 3 大电流密度。同样尺寸chip可以通过更大电流。
- 4 低IR
- 5 高抗ESD和R/C能力
- 6 高结温
- 7 高可靠性。



电源满足六级能效的首选产品

有效降低正向损耗，提升电源转换效率！

2. 超低VF肖特基二极管

制造:



采用低应力、环保、高端封装树脂

成品管100%过回流焊

芯片批100%抽样高温检测

无卤产品100%批次检测

2. 超低VF肖特基二极管

VR	普通SKY	超低VF SKY	VF降低率
40V/45V	0.55V	0.45V	18.20%
60V	0.65V	0.48V	26.10%
80V	0.80V	0.55V	31.20%
100V	0.80V	0.58V	27.50%
150V	0.90V	0.77V	14.40%
200V	0.95V	0.80V	15.70%

案例1——5A,100V 超低正向肖特基

做为2016年度销量最好的SR5100SL，已经被国内十几家知名客户选用，月销量300万只。该品种的典型参数如下表，VF降低30%以上。适用于12V输出电源，可提高2%以上的满载效率。

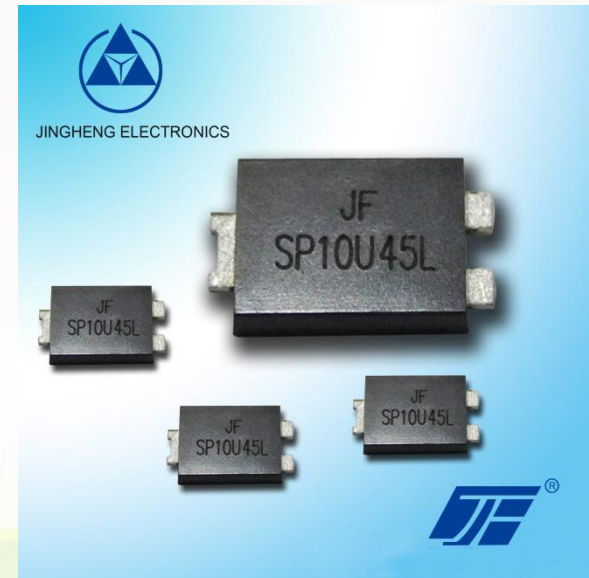
PARAMETER	SR5100 (普通)	SR5100SL (超低VF)
IF	5A	5A
VF@IF=5A	0.8V	0.55V
VR	110V	110V



案例2——10A,45V 低正向肖特基

SP10U45L-T是2A, 5V**智能手充**的代表性产品，既保持了低的正向压降，同时可适应温升高的应用环境。该产品同时将反向电压提高到50V以上，增强了应用过程中的安全性。超薄超小封装，可节省您的设计空间。可提高2%以上的满载效率。

PARAMETER	SP10U45 (普通)	SP10U45L-T (超低VF)
IF	10A	10A
VF@IF=10A	0.52V	0.43V
VR	48V	55V



案例3——20A,100V 低正向肖特基

此款产品是2016年市场热点产品，是满足12V大功率电源六级能效要求的代表品种。额定电流下，正向压降比常规肖特基低近30%。采用最先进的沟槽制造工艺，可提高2%以上的满载效率。

PARAMETER	SR20100CT (普通)	SR20100SLCT (超低VF)
IF	20A	20A
VF@IF=10A	0.81	0.57
VR	110	110



超低VF肖特基二极管 产品介绍

电流：1A--40A

电压：20V--200V

典型型号：SR340L, SS510L, SP10U45L, SP15U50L, SRF20100LCT等

封装：

轴向

DO-41, DO-15, DO-201AD



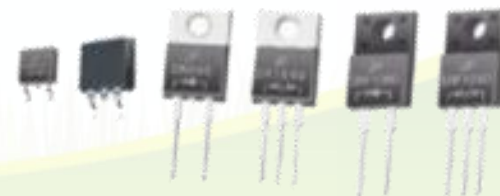
贴片

SOD123, SOD123F, SMA, SMB, SMC, T0277



大功率

T0220AC, T0220AB, IT0220AC, IT0220AB
T0252, T0263



3. SIC肖特基二极管

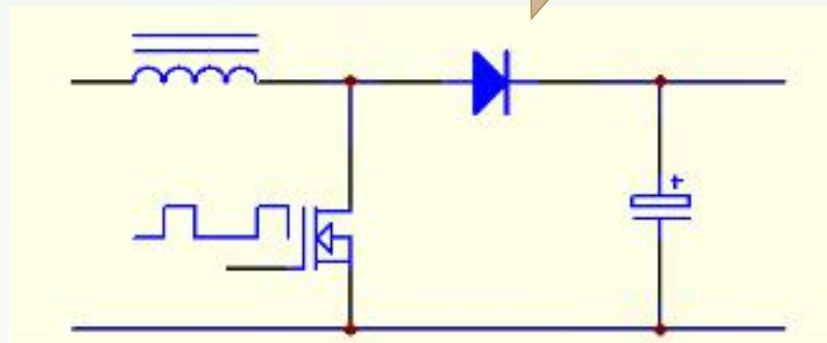
使用SIC材料作为衬底制成的具有肖特基特性的二极管。

特
点

- 01 没有存储电荷效应，理论 Q_{rr} 、 T_{rr} 为0
- 02 高反压 V_R （超过2000V）
- 03 低 V_F
- 04 低漏电（从常温到175°C， I_R 基本不变）
- 05 低 I_{RRM} （最大反向恢复电流）
- 06 T_{rr} 不随温度而变化
- 07 高结温
- 08 高成本

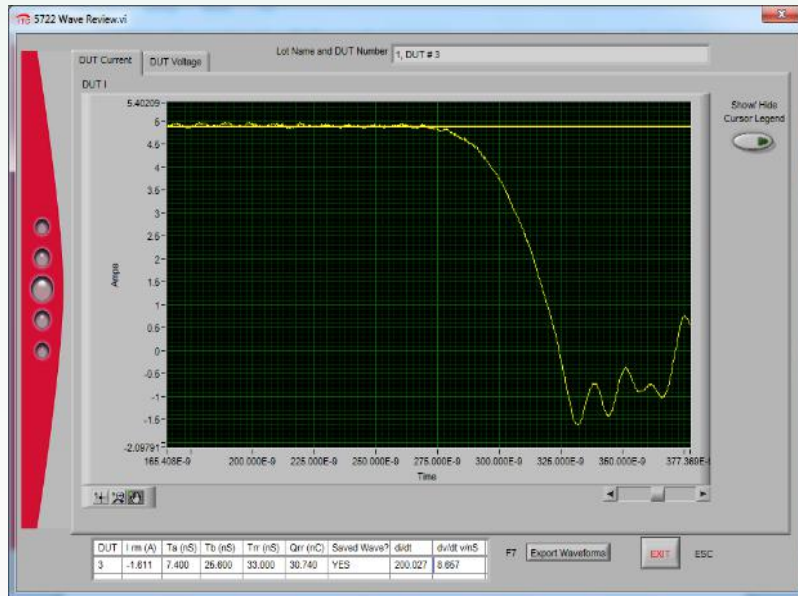
典型PFC电路

升压二极管

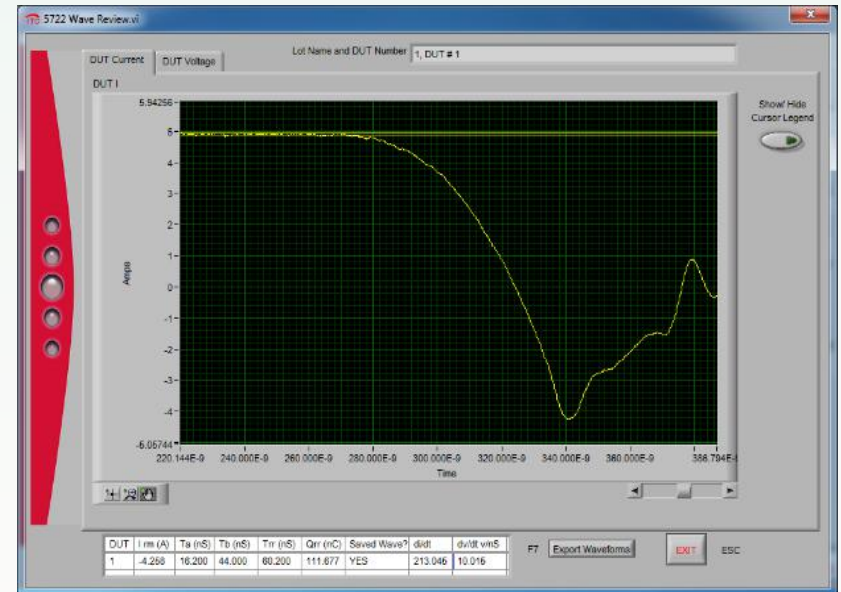


- 1) Q_{rr} 小。大了，二极管开关损耗大。
- 2) I_{rrm} 小。大了，与之配对的MOSFET/IGBT的电流应力和导通损耗大，也即转换效率低。
- 3) t_a/t_b （从 I_{rrm} 到 $0.25I_{rrm}$ 的时间）长，具有不陡峭的、钉状光滑的反向恢复波形。 t_b 长，从而有更小的 di/dt 。在寄生电感 L_s 相等的情况下，产生更小的 V_{rp} （电压尖峰），从而降低EMI。

SC1006和MUR1060反向恢复特性对比



SC1006



MUR1060

产品	Irrm	Ta	Tb	Trr	Qrr
SC1006	1.611A	7.4ns	25.6ns	33ns	30.740nc
MUR1060	4.258A	16.2ns	44.0ns	60.2ns	111.677nc

结论：SC1006的Irrm、Tb/Ta、Qrr都优于MUR1660；
使用SC1006能得到较高的转换效率和好的EMI特性。

SiC肖特基二极管技术参数表

封装形式	产品型号	绝对最大额定值		正向电压 V_F	反向漏电流	反向电压 V_R
		I_{FSM}	T_{stg}			
SMB	2A/2000V	8A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=2\text{A}$	$V_R=2000\text{V}$	$I_R=0.1\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.05\text{mA}$	$\geq 2500\text{V}$
TO-252 TO-220	6A/1200V	9A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=2\text{A}$	$V_R=1200\text{V}$	$I_R=0.1\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.05\text{mA}$	$\geq 1400\text{V}$
	10A/600V	40A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=10\text{A}$	$V_R=600\text{V}$	$I_R=0.1\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.05\text{mA}$	$\geq 700\text{V}$
	10A/1200V	40A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=10\text{A}$	$V_R=1200\text{V}$	$I_R=0.1\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.05\text{mA}$	$\geq 1400\text{V}$
TO-220 TO-263 TO-247	15A/1200V	60A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=15\text{A}$	$V_R=1200\text{V}$	$I_R=0.1\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.05\text{mA}$	$\geq 1400\text{V}$
	20A/600V	80A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=20\text{A}$	$V_R=600\text{V}$	$I_R=0.2\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.10\text{mA}$	$\geq 700\text{V}$
	25A/1700V	100A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=25\text{A}$	$V_R=1700\text{V}$	$I_R=0.2\text{mA}$
				$\leq 2\text{V}$	$\leq 0.10\text{mA}$	$\geq 2000\text{V}$
	30A/600V	120A	$-55^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$	$I_F=30\text{A}$	$V_R=600\text{V}$	$I_R=0.2\text{mA}$
				$\leq 1.8\text{V}$	$\leq 0.10\text{mA}$	$\geq 700\text{V}$

附加 大功率MUR系列超快恢复管

晶恒MUR系列产品，采用EPI芯片，wire-bond封装技术，国军标生产线制造，具有VF低，抗反向浪涌电流能力强，低应力封装的特点。批量应用于BOSCH电机、光伏逆变等大功率电源上。

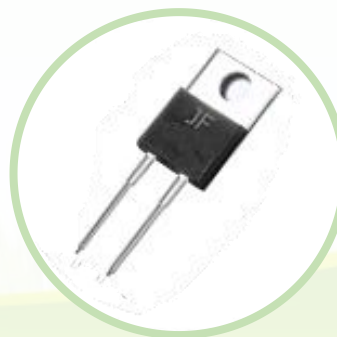
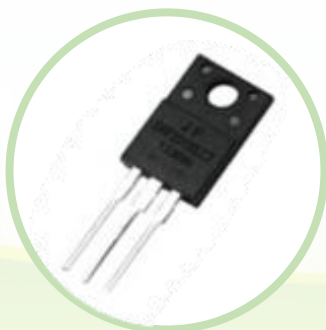
大功率MUR系列产品介绍

电流：6A—100A

电压：200V—1200V

封装：ITO-220AC, ITO-220AB, TO-220AC, TO-220AB TO-247 TO-3P

典型型号：MUR640，MUR840，MUR1060，MUR2060，MUR8120等



联系我们

- **济南总部 Headquarters**

地址：济南市和平路51号

电话：0531-86943657

传真：0531-86412824

邮箱：sale@jinghenggroup.com

网址：www.jingheng.cn

www.jinghenggroup.en.alibaba.com

- **晶恒工业园 Jingheng Industry Park**

地址：济南市长清区晶恒路1号

- **深圳办事处 Shenzhen Branch Office**

地址：深圳市福田区中康路卓越城北区2栋1003室

电话：0755-88391085

传真：0755-88391025

- **厦门办事处 Xiamen Branch Office**

地址：厦门市集美区杏林东路宁海一里46号

电话：86-592-5529106

传真：86-592-5529126

晶恒工业园
JINGHENG INDUSTRIAL PARK



THANK