

如何正确理解 FRED 和 FRD 的特性参数

巩鹏亮 刘清军 刘利峰 赵善麒

江苏宏微科技有限公司，江苏 常州 213022

Email: plgong@macmicst.com

摘要 本文针对 FRD (Fast Recovery Diode) 和 FRED (Fast Recovery Epitaxial Diode) 产品的特性参数，以江苏宏微科技有限公司模块封装的 FRED 产品参数表为例详细解释了快恢复二极管的相关参数。共分五部分对快恢复二极管的相关参数进行解释，对一些关键的参数如二极管的动态特性参数 t_{rr} 、 Q_{rr} 以及 I_{RRM} 进行了详细的探讨，同时给出了这些关键参数的测试方案与影响因素。在本文的最后一部分对快恢复二极管参数表中的常用数据曲线进行了分析解释，并总体描述出了各个曲线的变化趋势。

关键词 FRD FRED 模块 数据曲线

如何正确理解 FRED 和 FRD 的特性参数

巩鹏亮 刘清军 刘利峰 赵善麒

江苏宏微科技有限公司, 江苏 常州 213022

Email: plgong@macmicst.com

摘要 本文针对 FRD (Fast Recovery Diode) 和 FRED (Fast Recovery Epitaxial Diode) 产品的特性参数, 以江苏宏微科技有限公司模块封装的 FRED 产品参数表为例详细解释了快恢复二极管的相关参数。共分五部分对快恢复二极管的相关参数进行解释, 对一些关键的参数如二极管的动态特性参数 t_{rr} 、 Q_{rr} 以及 I_{RRM} 进行了详细的探讨, 同时给出了这些关键参数的测试方案与影响因素。在本文的最后一部分对快恢复二极管参数表中的常用数据曲线进行了分析解释, 并总体描述出了各个曲线的变化趋势。

关键词 FRD FRED 模块 数据曲线

1. 前言

随着电力电子技术的发展, 各种变频电路和斩波电路中新型电力电子器件的应用范围不断扩大, 这些电力电子线路不论主回路采用的是换流关断的 SCR, 还是具有自关断能力的 IGBT, GTO、MOSFET 等新型电力电子器件, 其均需要与之并联一个起续流、缓冲、吸收等作用的二极管, 以通过负载中的无功电流, 减少电容的充电时间, 同时抑制因负载电流瞬时反向而在器件或模块寄生电感中产生的高电压[1~3]。由于现代电力电子器件的频率和性能的不提高, 为了使二极管与功率器件的开关过程相匹配, 这些二极管必须在具有较低通态压降的基础上具有快速开通和快速关断的能力, 即具有短的反向恢复时间 t_{rr} , 较小的反向恢复电流 I_{RM} , 同时具有软恢复特性。与传统整流二极管相比, 此种二极管不论从器件结构和工艺上还是器件特性上均与之有较大的差别, 因此如何正确理解其参数表给出的器件参数就成为一个器件使用者即电力电子线路设计者首先要解决的问题。这类二极管包括 FRD (Fast Recovery Diode) 和 FRED (Fast Recovery Epitaxial Diode) 两种类型, 二者最主要的差别是它们的原始基片不同: FRD 使用的是三重扩散片做成, 而 FRED 使用的是外延片做成。他们的电学特性参数及应用范围十分接近, 因此一般意义上均作为同一类型器件进行考虑。

本文针对 FRD 和 FRED 的电学特性参数, 以 MacMic 公司[4]单管或模块封装的 FRD 和 FRED 产品参数表为例详细解释快恢复二极管相关参数, 其中大多数参数是给出相关定义和说明。在几个重要参数下, 将提供较多的论述来阐明如何使用参数表所提供的信息。文中按照参数表的项目内容划分成几个对应的部分来介绍: 最大额定值参数部分, 静态电参数部分, 动态电参数部分以及特性曲线部分。

2. 各部分参数的理解

FRD 和 FRED 的参数一般分为电学参数、机械参数、

热学参数以及特性曲线四个部分, 而电学参数又可以分为动态参数和静态参数。在二者的参数表中, 首先给出的是最大额定值参数部分, 最后给出各个参数的特性曲线。下边以 MacMic 公司的 MMF300Z060DK1 FRED 模块为例分别对上述几个参数部分进行解释。

2.1 最大额定值参数部分

最大额定值部分参数表的内容如表 1 和表 2 所示。

表 1 MMF300Z060DK1 的最大额定部分参数表_1

Symbol	Parameter	Test Conditions	max	Unit
V_R	DC reverse voltage		600	V
V_{RRM}	Repetitive Reverse Voltage		600	V
$I_{F(AV)}$	Average Forward Current	$T_c=75^\circ\text{C}$, rec.d=0.5	95	A
$I_{F(RMS)}$	RMS Forward Current	$T_c=75^\circ\text{C}$	142	A

表 1, 2 所示为 MMF300Z060DK1 双塔封装模块参数表中最大绝对额定部分参数。从表中可知, 此部分给出的是一些关键参数的最大额定值, 例如, 直流反向电压 V_R , 平均正向电流 $I_{F(AV)}$, 最大功耗 P_{tot} , 结温范围 T_j 等。

V_R 是指加于二极管两端所允许的最大直流反向电压, 在整个二极管工作温度范围内这个直流反向电压 V_R 均有效^[5]。实际的二极管击穿电压 V_{BR} 会比 V_R 大 5% 到 10%, 因此任何一个电路设计方案均应使二极管两端电压保持在这个范围之内。二极管必须在电压等于 V_R 或者低于 V_R 的情况下工作, 如果超过了实际的击穿电压, 二极管将被损坏。在某些情况下, 制造二极管的厂商给出不可重复雪崩耐量的额定值, 这个有关雪崩耐量的额定值是由二极管可以承受多大的

雪崩能量来规定的。即使对于具有较大雪崩耐量的二极管，仍然建议在设计中要避免雪崩击穿；而应该在二极管被那些极少有的、太大的电压瞬态值击穿时，将雪崩耐量用来作为一种保护。MacMic 公司的二极管在设计时均考虑一定的雪崩耐量，并在出厂检测时对每一个模块产品检查它们的雪崩耐量，尽管这个值在参数表中没有给出。

表 2 MMF300Z060DK1 的最大额定部分参数表_2

Sym bol	Parameter	Test Conditions	max	Unit
I _{FSM}	Non-repetitive surge	T _j =45°C;t=10ms(50Hz),sine	1200	A
		T _j =45°C;t=8.3ms(60Hz),sine	1300	A
	forward current	T _j =75°C;t=10ms(50Hz),sine	1080	A
		T _j =75°C;t=8.3ms(60Hz),sine	1170	A
I ² t	Rating for fusing	T _j =45°C;t=10ms(50Hz),sine	7200	A ² s
		T _j =45°C;t=8.3ms(60Hz),sine	7100	A ² s
		T _j =75°C;t=10ms(50Hz),sine	5800	A ² s
		T _j =75°C;t=8.3ms(60Hz),sine	5700	A ² s
T _J	Junction Temperature Range		-40 to +150	°C
T _{STG}	Storage Temperature Range		-40 to +125	°C
P _{tot}	Total power consumption		280	W
V _{isol}		50/60Hz,RMS t=1min	3000	V

V_{RRM} 是所允许的二极管最大重复反向电压瞬时值。它是一个周期性的电压，包括换流时的尖峰、感性冲击等，还有其它在每一个周期中出现的瞬态电压，

这些瞬态电压是由电路和二极管本身的特性导致的，而且在某些程度上，受线路设计者控制。二极管必须在电压等于或者低于 V_{RRM} 的情况下工作，如果超过了实际的击穿电压，二极管将被损坏。它与 V_R 的区别是他的测试条件是正弦半波电压下的值，更接近与二极管的 V_{BR} 值。但在 MacMic 公司的 FRD 和 FRED 参数表中，这两个参数的值与反向工作电压 V_{RWM} 是相等的，电路设计者必须确保在任何条件下，所有的电压，不管是有意或是无意的，都必须保持在最大额定值范围内，以遵从技术规范和维护二极管可靠的工作。

I_{F(AV)}是指当壳温保持在 25°C~75°C之间一个规定温度值时，使结温低于所允许的最大结温时，二极管所允许的最大正向平均电流。在 MacMic 公司的二极管参数表中，这个平均值是以一系列占空比为 50% 的方波为基础的。在这样的一系列方波中，其平均电流是峰值电流的一半。例如，一个 15A 的电流额定值就意味着一系列占空比为 50% 的峰值电流为 30A 的方波。其它公司的二极管 I_{F(AV)}可能是以正弦半波为基础计算的，即是，脉冲间隔时间相当于脉冲的持续时间。由于如今的 FRD 和 FRED 通常被用来处理高频的方波或者梯形波脉冲，这种正弦半波脉冲平均值得计算方法不再适合，而 MacMic 公司的这种以一系列方波脉冲为基础的计算方法更适合于现实应用。

I_{F(RMS)}是指当壳温维持在 25~75°C之间的某一值时允许的最大电流均方根值。I_{F(RMS)}与 I_{F(AV)}的计算一样，使用的都是方波电流。I_{F(RMS)}的计算公式为：

$$I_{F(RMS)} = I_{F(Peak)} \sqrt{\delta} \quad (1)$$

其中 I_{F(Peak)}为方波的最大瞬态电流值，δ 为方波的占空比。对于 MacMic 公司的二极管产品，δ 值取为 50%，并且壳温为 75°C。

I_{FSM}是指在结温 T_J为某一温度时，正弦半波浪涌脉冲基波宽度为 8.3ms 或者 10ms 条件下，所能允许的最大不重复的半正弦波浪涌电流。这个参数的测试方法是一种破坏性测试：测试时用一个单脉冲浪涌电流对被测二极管进行冲击，然后检查被测二极管是否被损坏，如果被测二极管损坏，将对应浪涌脉冲的峰值电流，再对下一个二极管进行测试。如果被测管没有损坏，则先让它的结温降低到规定结温 T_J后增加浪涌电压的峰值，重新对被测二极管进行冲击。重复以上步骤，直到所有的二极管样品全部被损坏。最后取所有记录的浪涌电流平均值既得对应结温下的 I_{FSM} 值。

I²t 是正向浪涌电流的平方对电流浪涌持续时间的积分值。这个参数的意义在于当电路中需要加装快速熔断器时，熔断器的选择要依据二极管的 I²t 定额进行。

T_J 是指所允许的工作结温范围, 也即是 $-55^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ 。同样地, T_{STG} 是指所允许的储存温度范围。正如 MMF300Z060DK1 参数表所示的那样, 这两种温度范围通常是相同的。建议二极管的工作结温或储存温度不要超过该规定范围。

P_{tot} 指最大总功耗, 它是指在结温不超过最大结温时二极管所能处理的最大功耗, 其计算公式为:

$$P_{\text{tot}} = \frac{T_J - T_C}{R_{\text{thjc}}} \quad (2)$$

式中 T_J 为二极管结温, 确切是指芯片的温度, T_C 为壳温, 一般是指与散热器相连的铜基板的温度; R_{thjc} 为从管芯到管壳及铜板的最大热阻。

V_{iso} 为模块铜基板与 DCB(Direct Copper Bonding) 板之间陶瓷层的击穿电压, 它是模块参数表中特有的参数, 表达了 DCB 板下作为绝缘用陶瓷层的抗电击穿能力。MacMic 公司使用的 DBC 板陶瓷材料为 AlN, 相对于 DBC 板为 Al_2O_3 材料的其他公司的模块, MacMic 公司的 FRED 模块具有更低的热阻, 更高的绝缘耐压。

2.2 静态电特性部分参数

表 .3 MMF300Z060DK1 静态电特性部分参数

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max	Unit
I_{RM}	Reverse Leakage Current	$V_R=600\text{V};$	--	--	2	mA
		$V_R=480\text{V};$	--	--	0.5	mA
		$V_R=480\text{V};$ $T_J=125^{\circ}\text{C}$			34	mA
V_F	Forward Voltage	$I_F=100\text{A};$	--	--	1.36	V
		$I_F=100\text{A};$ $T_J=125^{\circ}\text{C}$			1.55	V
		$I_F=300\text{A};$			2.05	V
		$I_F=300\text{A};$ $T_J=125^{\circ}\text{C}$			2.09	V

表 3 所示为 MacMic 公司的 FRED 模块 MMF300Z060DK1 的静态电特性部分参数, 它与上部分介绍的最大额定值部分参数最大的不同是此处给出的是典型值或最大值, 是由参数本身或者器件端特性条件而决定。这些额定值是在参数表中所规定的特殊条件下的静态或者直流的额定值。

I_{RM} 是在规定 V_R 规定结温下给出的最大反向漏电流。如果一个二极管的反向漏电流测量值超过参数表中的规定值, 则这个二极管就不合格。在 MacMic 公司的二极管参数表中, 给出了两组条件下的 I_{RM} 值, 只有其中的一组说明结温为 $T_J=125^{\circ}\text{C}$; 另一没有说明结温

的就是在 $T_J=25^{\circ}\text{C}$ 条件下的值。

V_F 是二极管在规定正向电流 I_F 规定结温 T_J 下的正向电压^[6]。表 3 所示参数表中, V_F 的最大值在结温 T_J 为 125°C , 壳温 T_C 为 25°C , I_F 为两倍额定电流的条件下得到。应用中, 对二极管的 V_F 和开关速度会有一个折衷的考虑, 对于具有相同额定电流或者相同管芯面积的二极管, 设计用来快速关断的二极管的正向压降比慢速关断的二极管的正向压降要高。

2.3 动态电特性部分参数

表 .4 MMF300Z060DK1 动态电特性部分参数

Sy mb ol	Para- meter	Test Conditions	Mi n.	Typ.	Max	U nit
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_F=100$ A $V_R=30$ 0V	--	14	--	ns
		$T_J=100^{\circ}$ C	--	250	300	ns
I_{RM}	Max. Reverse Recovery Current	$dI_F/dt=$ $-200\text{A}/$ μs $T_J=100^{\circ}$ C	--	21	--	A

表 4 所示为 MacMic 公司 MMF300Z060DK1 FRED 模块的动态电特性部分参数, 这一部分是 FRD 和 FRED 与传统整流二极管和肖特基二极管有重大区别的地方。FRED 和 FRD 在具有低的通态压降和高的阻断电压的条件下同时又具有快速开通和快速关断的能力。文献[7]中指出, 整流二极管的反向恢复时间一般在 $5\mu\text{s}$ 以上, 而 FRD 的反向恢复时间在 $5\mu\text{s}$ 以下, 对于 MacMic 公司以特殊工艺以及特殊寿命控制方法制造的 FRED 产品, 其反向恢复电流可以降到 20ns 以下, 并且具有比较软的恢复电流波形。二极管反向恢复波形示意图如图 1 所示。

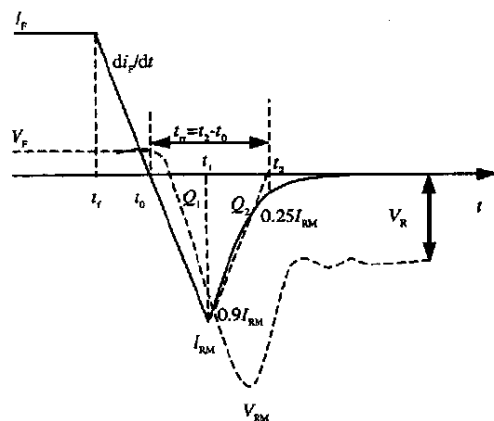


图 1. 二极管反向恢复波形示意图

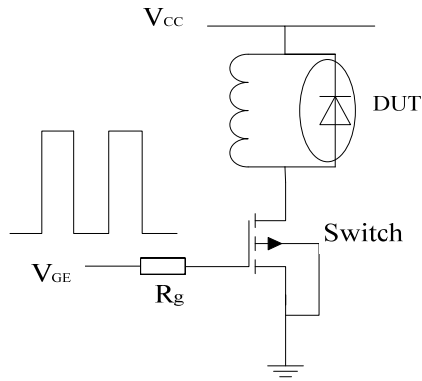


图 2. 二极管反向恢复特性测试线路示意图

图1结合表4可知，反向恢复时间 t_{rr} 即为图示中的 t_2-t_0 ，即从二极管正向电流过零开始到二极管反向电流极大值 I_{RRM} 与0.25倍 I_{RRM} 连线与时间轴交点截至处之间的时间。 I_{RRM} 为二极管瞬态反向电流的极大值， Q_{rr} 即二极管电流反向部分与时间的积分值，它们的测试参数是正向电流下降率 di_F/dt ，母线电压 V_{CC} ，正向电流 I_F ，以及二极管管芯结温 T_J 。反向恢复时间 t_{rr} ，反向峰值电流 I_{RRM} ，反向恢复电荷 Q_{rr} 的测试电路示意图如图2所示^[8]。正向电流下降率 di_F/dt 由开关器件MOSFET或IGBT的开通时间决定，也即是由开关器件的驱动电路的驱动电阻 R_g 决定，通过改变 R_g 大小就可以改变 di_F/dt 的大小；母线电压 V_{CC} 由电路所施加的电压决定，典型值为二极管反向直流电压 V_R 的80%（室温或25℃下）或50%（125℃或者150℃下）；正向电流由开关管开通器件在电感中充电能量来决定，也即是由栅极驱动脉冲宽度 T_1 决定，宽度变大 I_F 升高；二极管管芯结温 T_J 等同于壳温 T_C ，即二极管的结温采用从外部加热的方式获得。

二极管动态特性不仅受测试条件的影响另外也受测试电路中的其他因素影响，例如由于用作开关的器件不相同，使得寄生参数发生改变；一个电路中使用了缓冲电路，而另一个没有用；一个在开关器件的栅极和源极之间或者栅极和发射极之间加上了一个吸收电容，而另一个则没有加等因素。动态特性尤其是 t_{rr} 与所有的这些影响均有关系，不恰当的测试电路或测试方法会使得反向恢复电压波形产生振荡，反向恢复电流波形形成突起以及电流波形拖尾等现象，影响动态特性的精确性。因此电路设计者在比较不同厂家的相似的二极管动态参数以确定究竟那家的产品更适合于特定的电路时，最好的方法是进行测试，即使用同一个测试电路对不同厂家的二极管进行测试，最终得出更适合于特定电路的FRD或FRED产品。

2.4 热特性参数部分

表 .5 MMF300Z060DK1 热特性部分参数

Sym bol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance Junction-to-Case	--	--	0.45	K/W

表5所示为MacMic公司MMF300Z060DK1 FRED模块的热特性参数 $R_{\theta JC}$ ，它是对从二极管的管芯到二极管外壳的基板之间热流的阻抗。从管芯到基板的路径是最小热阻抗的路径。在参数表中给出的是从管芯到外壳的热阻，而不是管芯通过一个散热器到周围环境的热阻，这是因为设计者所选择的散热器材料和界面材料对于参数表制作人员来说是未知的。由于 $R_{\theta JC}$ 是基于未知散热器形式的假设上的，所以电路设计者仅仅知道 $R_{\theta JC}$ 是不够的，电路设计者必须根据所使用的散热器材料以及界面材料来计算总热阻，从而得出由散热器和外壳再到散热器外部环境的热阻 $R_{\theta JA}$ 。

2.5 特性曲线部分

在参数表的最后给出包括FRD或FRED的静态电参数、动态电参数、瞬态热阻曲线以及二极管的封装外形在内的曲线图示。它包括正向电流/电压关系曲线、反向恢复电荷与正向电流下降率关系曲线、反向恢复峰值电流与正向电流下降率关系曲线、反向恢复电荷和反向恢复峰值电流与结温关系曲线、反向恢复时间与正向电流下降率关系曲线、正向恢复峰值电压/恢复时间与正向电流下降率关系曲线、瞬态热阻与占空比关系曲线和模块或分立器件封装外形示意图等八个部分。下边分别对其作出介绍。

2.5.1 正向电压与正向电流的关系曲线

此曲线取自于二极管特性曲线图示仪，用来表示二极管的电流传输能力。它表示在一定管芯结温下使二极管流过一定安培数的电流时器件两端电压。在同样的正向电流下，随着管芯结温的升高二极管的正向电压不断降低。从此曲线可知二极管在一定电流下的管压降呈负温度系数，这不利于二极管的并联使用。

2.5.2 反向恢复电荷与电流衰减速率的关系曲线

该曲线表示了反向恢复电荷随 di_F/dt 变化的函数关系。在MMF300Z060DK1的参数表中，从反向恢复电荷 Q_{rr} 与 di_F/dt 的关系曲线看出，对于一个给定的 I_F ，当 di_F/dt 增加时，反向恢复电荷 Q_{rr} 也同样增加。同时该曲线也显示，对于给定的 di_F/dt 当 I_F 增加时反向恢复电荷 Q_{rr} 也随之增加。

2.5.3 最大反向恢复电流与正向电流下降率关系曲线

该曲线表示最大反向恢复电流 I_{RRM} 随 di_F/dt 的变

化关系。在MMF300Z060DK1的参数表中,从最大反向恢复电流 I_{RM} 与 di_F/dt 的关系曲线可知,对于一个给定的 I_F ,当 di_F/dt 增加时,最大反向恢复电流 I_{RRM} 也同时增加。同时关系曲线也显示出,对于给定的 di_F/dt 当 I_F 增加时最大反向恢复电流 I_{RRM} 也随之增加。

2.5.4 动态参数与结温关系曲线

电路设计者也许还想知道二极管动态参数随结温的变化情况,而此曲线就给出了 Q_{rr} 和 I_{RRM} 随结温的变化。在MMF300Z060DK1的参数表中,这两个参数都随着结温从 $0^{\circ}C$ 到 $150^{\circ}C$ 的升高而增加。 I_{RRM} 约增加了约3倍,而 Q_{rr} 则增加了几乎4.5倍。

2.5.5 反向恢复时间与电流下降率关系曲线

此曲线表示反向恢复时间 t_{rr} 随 di_F/dt 的变化关系。从上述MacMic公司FRED模块参数表可知,随着 di_F/dt 增加,反向恢复时间 t_{rr} 减小。同样在该图中看出,对于给定的 di_F/dt ,随着正向电流 I_F 增加 t_{rr} 随之增加。

2.5.6 正向恢复电压/时间与电流下降率关系曲线

该曲线表示正向恢复电压 V_{FR} 和正向恢复时间 t_{FR} 随 di_F/dt 的变化关系。从上述参数表可以看出随 di_F/dt 增加, V_{FR} 线性增加,而 t_{FR} 则不断减小。

2.5.7 瞬态热阻与脉冲持续时间关系曲线

前述MacMic公司参数表所示瞬态热阻与脉冲持续时间关系曲线是基于热时间常数概念的。对于具有规定幅值和占空比的功率脉冲方波,结到壳的瞬态热阻抗 $Z_{\theta JC}$ 比静态的热阻要小一些,瞬态热阻抗 $Z_{\theta JC}$ 的数值取决于热时间常数、占空比和功率脉冲的幅值。

2.5.8 FRD或FRED封装外形图

在功率快恢复二极管参数表的最后部分总是给出二极管封装外形图及各部分标注。一般情况下各种封装形式均为标准封装,例如T0-220封装、T0-247封装等,本文例中MacMic公司的MMF300Z060DK1 FRED使用的是双塔模块封装形式,这种封装在一个模块中以共阴极的形式封装了两个单元的FRED芯片,并且此种封装铜基板即是模块的共阴极端子。

3. 结论

文中针对FRD和FRED产品的特性参数,以MacMic公司模块封装的FRED产品数据表为例详细解释了快恢复二极管的相关参数。总共分五部分对快恢复二极管的相关参数进行解释,对一些关键的参数如二极管的动态特性参数 t_{rr} 、 Q_{rr} 以及 I_{RRM} 进行了详细的探讨,同时给出了这些关键参数的测试方案与影响因素。在本文的最后一部分对快恢复二极管参数表中的常用数据曲线进行了分析解释,并总体描述出了各个曲线的变化趋势。本文对电子线路的设计者在参

数表的理解方面具有重要的参考意义。

参考文献

- [1] 张清纯,张斌等.新型大功率快恢复二极管:SIOD.半导体技术.1998,23(1):30~34
- [2] 张海涛,张斌等.采用缓冲层结构的快恢复二极管的研究.电力电子技术,2003,37(2):79~81
- [3] 周乃冲 孙明等.快速二极管反向恢复软度与反向恢复过电压.电力电子技术.1997,1:85~87
- [4] 江苏宏微科技有限公司.<http://www.macmicst.com/>.江苏常州
- [5] Muhannad H. Rashid 主编,陈建业,梁自泽等译.电力电子技术手册[M].机械工业出版社.2004.
- [6] GB/T 4023-1997.半导体分立器件和集成电路,第2部分:整流二极管.1997
- [7] 张海涛,张斌.大功率快速恢复二极管概述.半导体情报.2001,38(3):1~9
- [8] N.Y.Y.shammas 著,童一凡译.外部工作条件对大功率快恢复二极管的影响.变流技术与电力牵引.2000,1:22~28

作者简介:

巩鹏亮 男,1982年10月1日出生,硕士学历,现为江苏宏微科技有限公司测试工程师,目前工作方向为中大功率IGBT及FRED模块和单管测试以及相关测试设备开发。