

SMPS 功率器件性能分析比较

Analysis and Comparison on SMPS Power Devices Characteristic

赵忠礼

Zhao Zhongli

北京时代新晨电子技术有限公司 100080 北京

Beijing Brilliance Time Electronic Technology Co., Ltd

摘要: 本文对 SMPS 功率器件性能和一定应用条件下的 f_{sm} 和 T_j 的计算分析。给出了器件选择和应用的原则。

Abstract: This article introduces SMPS Power Device characteristics and the calculation as well as the analysis of f_{sm} and T_j under specific condition. It also gives out the rule of the selection and application of the devices.

关键词: SMPS 功率器件, 分析和比较

Keywords: SMPS Power Devices, Analysis and Comparison

引言:

SMPS (Switching Mode Power Supply) 朝着高频、高效、高可靠, 高功率因数和低成本的方向发展。功率器件则要求高速、高可靠、低损耗和低成本。目前所用功率器件主要是 MOSFET 和 IGBT。功率 MOSFET 的发展是围绕降低高压 MOSFET 的导通电阻 $R_{DS(ON)}$ 的, 为此出现了 IGBT 和 COOLMOS。IGBT 是在 MOSFET 的漏极加一 P^+ 层, 注入少数空穴实现电导调制作用, 从而降低导通电压。COOLMOS 则是利用 P 型镶条的插入和降低漂移区的电阻实现电荷补偿作用达到降低 $R_{DS(ON)}$ 的目的。在高速、低损耗 MOS7 的工艺基础上生产的 MOS7-IGBT, 实现了高速、低损耗、低成本及短拖尾时间。在开关频率 $f_s \leq 100$ KHz 的应用领域是高压功率 MOSFET 的强有力竞争对手。

目前供电路设计者选择的 SMPS 功率器件有: 第五代 MOSFET (MOS5), 第七代 MOSFET (MOS7), COOLMOS 和 MOS7-IGBT。这四种器件基本代表了近几十年来 SMPS 器件的发展成果。以下从半导体器件原理的角度比较分析了四种器件的电性能、可使用性及经济性, 供使用者选择器件和设计计算参考。

一、四种 SMPS 器件的电性能:

1. MOSFET、COOLMOS 和 IGBT 的结构及电流传输

图 1 给出 MOSFET、IGBT 和 COOLMOS 的结构和电流传输机构图。由于器件的结构和电流传输的不同，使得电性能也不同。

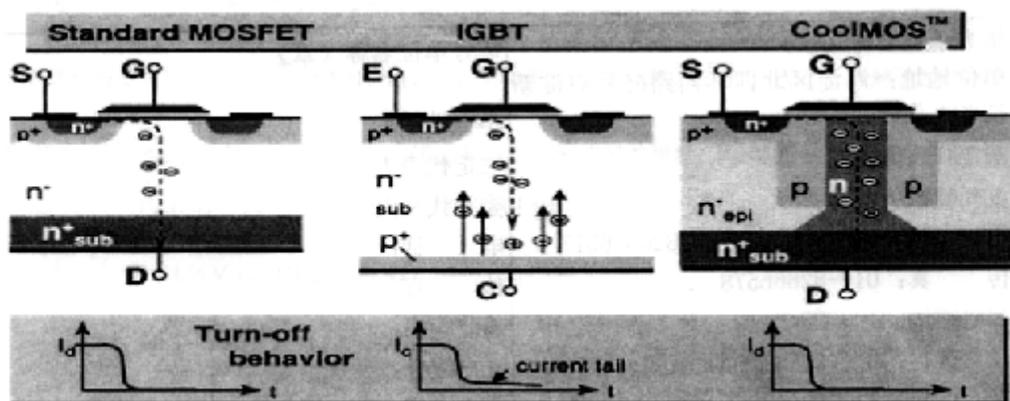


图 1 MOSFET、IGBT 和 COOLMOS 的结构和电流传输

2. 主要电参数:

表 1 给出 APT5010LVR (MOS5)、APT5010B2LL (MOS7)、APT47N60BC3 (COOLMOS) 和 APT30GP60B (MOS7-IGBT) 的主要电参数的汇集表。

表 1: 主要电参表

型号 参数	APT5010LVR	APT5010B2LL	APT47N60BC3	APT30GP60B
P_T (25°C) (W)	520	500	415	562
I_D (I_C) (25°C) (A)	47	46	47	100
I_D (I_C) (100°C) (A)				49
V_{BR} (V)	500	500	600	600
$R_{DS(ON)}$ (Ω)	0.10	0.10	0.07	2.4V ($\frac{2.4V}{30A} = 0.08$)
R_{thic} (°C/W)	0.24	0.30	0.30	0.27
E_{AS} (单脉冲) (mj)	2500	1600	1800	SSOA

E_{AR} (重复)(mj)	50	50	1	120A 600V 150°C
I_{AR} (A)	47	46	20	120
$t_{d(on)}$ (ns)	14	11	18	11
t_r (ns)	16	15	27	19
$t_{d(off)}$ (ns)	54	25	111	60
t_f (ns)	5	3	8	69

二、SMPS 器件可使用最高开关频率 f_{sm} 和结温 T_j 的计算：

IGBT 能否用于高速开关电路决定于两个方面：

1. 使用条件下的 f_{sm} 是多少
2. IGBT 的关断电流拖尾 t_{tail} 是多长。 t_{tail} 太长死区时间也要长，限制了使用频率。

MOSFET 和 IGBT 的手册中并没有给出 f_{sm} ，一般情况下 IGBT 模块给出最高使用频率小于等于 25KHz，也没有给出在什么条件下 $f_{sm} \leq 25$ KHz。要想求得应用条件下的 f_{sm} ，必须知道开关损耗功率 $P_s = f_s \cdot (E_{on} + E_{off})$ 。 E_{on} 和 E_{off} 是手册中给出的在测试条件下一个周期内的导通能量和关断能量损耗。对于设计和工艺一定的功率器件，在一定的使用条件下 E_{on} 和 E_{off} 是确定的。所以 f_s 越高， P_s 越大而结温 T_j 越高。当 T_j 大于规定值（一般 $T_j \leq 125$ °C）产生烧毁。

功率器件的总损耗 $P_T = \frac{T_j - T_c}{R_{thic}} = P_c + P_s + P_R + P_D$ ，其中 P_c 为导通损耗，

$P_c = DI_C \cdot V_{ce(on)}$ （对于 MOSFET $P_D = D \cdot I_D^2 \cdot R_{ds(on)}$ ） D 为占空比。 $P_s = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sm}$ 为开关损耗。 P_D 和 P_R 分别为驱动和反向截止损耗。 P_D 、 P_R 和 P_c 、 P_s 相比是很小的，这里可以忽略不计，则：

$$P_T = \frac{T_j - T_c}{R_{thic}} = D \cdot I_c \cdot V_{CE(on)} + (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sm}$$

$$\therefore f_{sm} = \frac{\frac{T_j - T_c}{R_{thic}} - D \cdot I_c \cdot V_{ce(on)}}{E_{on} + E_{off}} \quad (1)$$

$$T_j = R_{thic} [f_{sm} \cdot (E_{on} + E_{off}) + D \cdot I_c \cdot V_{ce(on)}] + T_c \quad (2)$$

(1)、(2) 式中 T_j 是使用中控制的结温，一般 $T_j \leq 125$ °C， T_c 是由散热器控制的壳温（一般 $T_c \leq 80$ °C）。 $V_{ce(on)}$ 是 $T_j \leq 125$ °C 的压降。一般手册中，IGBT 给出测试条件下的 E_{on}

和 E_{off} ，MOSFET 没有给出 E_{on} 和 E_{off} 。为比较以上四种器件的 f_{sm} 和 T_j ，我们根据 E_{on} 和 E_{off} 的测试方法来估算 MOSFET 的 E_{on} 和 E_{off} 。图 2 和图 3 分别是 APT30GP60B 测试时的开关和关断波形。

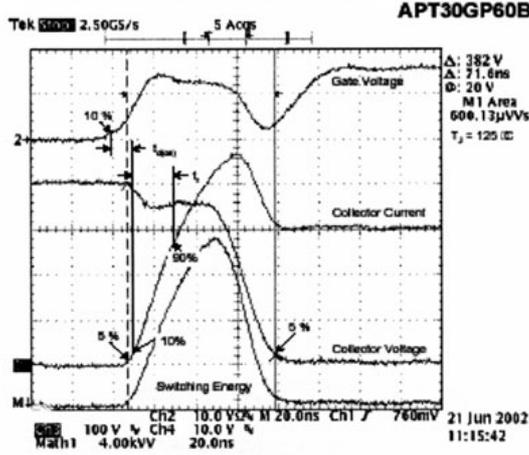


图 2 APT30GP60B 开通波形

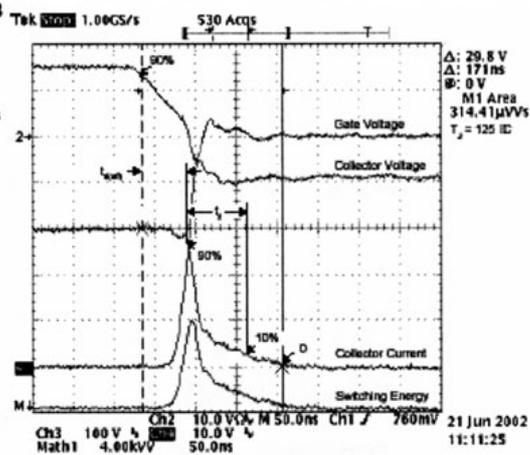


图 3 APT30GP60B 的关断波形

$$\text{而, } E_{on} = \int_0^{t_{on}} V(t)I(t)dt \quad (3)$$

$$E_{off} = \int_0^{t_{off}} V(t)I(t)dt \quad (4)$$

对于电感负载 (3)、(4) 近似为

$$E_{on} = \frac{1}{2}VIt_{on} \quad E_{off} = \frac{1}{2}VIt_{off}$$

由图 2 和图 3 可见，(3)(4) 的积分上限对于 E_{on} 来讲 $t_{on} = t_{on} + t_{rr}$ ； E_{off} 中 $t_{off} = t_{off}$ 。V 和 I 是测试或使用中的电压和电流。 t_{on} 和 t_{off} 分别为测试管的导通时间和关断时间， t_{rr} 是反并联二极管的反向恢复时间，在 E_{on} 中 $I = I_C + I_{RRM}$ 。

我们假定上述四种器件用于同一桥式硬开关电路中， $T_j \leq 125^\circ\text{C}$ ， $T_c \leq 80^\circ\text{C}$ ， $V_{CE} = 300\text{ W}$ ， $I_c = 30\text{ A}$ ， $D=0.5$ ， $f_s=100\text{ KHz}$ 。桥式电路四个主开关器的反并联二极管选用 APT30D60B。查手册 APT30D60B 的 $t_{rr} = 80\text{ ns}$ (100°C)， $I_{RRM} = 7.5\text{ A}$ ，将上述条件和表 1 中的相关参数代入式 (5)、(6)，求得各器件的 E_{on} 和 E_{off} 汇总，如表 2 所示：

表 2: E_{on} 和 E_{off} 的计算值

型号 参数	APT5010LVR	APT5010B2LL	APT47N60BC3	APT30GP60B
E_{on} (μj)	495.0	477.0	562.5	495.0
E_{off} (μj)	265.5	126.0	535.5	580.5
$E_{ts} = E_{on} + E_{off}$	760.5	603.0	1098.0	1075.5

将 E_{on} 和 E_{off} 代入 (1)、(2) 式计算 f_{sm} 和 T_j , 结果见表 3。

表 3: f_{sm} 和 T_j 的计算

型号 参数	APT5010LVR	APT5010B2LL	APT47N60BC3	APT30GP60B
$\frac{T_j - T_c}{R_{thic}}$ (W)	187.5	150	150	166.6
$D \cdot I_C \cdot V_{ce(on)}$ 或 $D \cdot I_D^2 \cdot R_{ds(on)}$ (W)	45.0	45.0	31.5	36.0
$f_s \cdot (E_{on} + E_{off})$ (W)	76.0	60.0	109.8	107.6
f_{sm} (KHz)	187.0	174	108	120
T_j ($^{\circ}C$)	109.0	111.5	122.4	118.8
$P_T = P_C + P_S$ (W)	121	105	140.8	143.6

三、四种器件的工艺及成本比较:

四种器件的管芯号、芯片面积、工艺难度系数、光刻次数、归一成本和元胞及栅结构列于表 4。

表 4: 四种器件的工艺和成本比较

型号 参数	APT5010LVR	APT5010B2LL	APT47N60BC3	APT30GP60B
芯片号·面积(mm^2)	7# 120	6.5# 90.5	6# 61	5# 43
工艺难度系数	1	1	1.5	1.2
光刻次数	7	7	15	7
归一成本	2.5	2.0	1.67	1
元胞及栅结构	叉指多晶-AL 双层	叉指多晶-AL 双层	六角、多单晶层	叉指多晶-AL 双层

四、分析与讨论：

1. 四种器件电性能的分析与讨论

以上我们从四种 SMPS 功率器件的主要电参数出发，利用半导体器件的基本原理，在相同的应用条件下，计算了各器件的总功率、导通损耗、开关损耗、最大应用频率和结温。从可靠应用的角度讲，在一定总功耗下的器件损耗越小，效率越高而结温 T_j 越低越好。 T_j 每低 1°C 可靠性就有较大提高。所以比较器件的优劣是在相同的使用条件下比较 T_j 高低。在高频开关应用时比较可使用的最高频率 f_{sm} 。对于 MOSFET 和 IGBT 还要比较雪崩能量额定值和开关安全工作区 SSOA。

从表 1 的主要电性参数看，四种器件的最大额定值参数比较接近。只有 MOS7-IGBT，APT30GB60B 的集电极电流较高， $T_c = 25^\circ\text{C}$ 时 $I_c = 100\text{ A}$ ， $T_c = 110^\circ\text{C}$ 时， $I_c = 49\text{ A}$ 。对于 $R_{DS(on)max}$ ，MOS5 和 MOS7 均为 $0.1\ \Omega$ ，COOLMOS 是 $0.07\ \Omega$ ，MOS7-IGBT 的 $V_{CE(ON)}$ 为 2.4 V ，换算成导通电阻为 $0.08\ \Omega$ 。这充分显示了 COOLMOS 的降低 $R_{DS(ON)}$ 作用，对于 MOS7-IGBT 也显示了电导调制作用。对于开关参数 t_{on} ，四种器件大同小异，而 t_{off} 则是 COOLMOS 和 MOS7-IGBT 较长。对于决定可靠性的雪崩击穿能量额定 E_{AR} 来讲，三种 MOSFET 有较大的差别，MOS5 和 MOS7 是 50 mj ，而 COOLMOS 的 E_{AR} 只有 1 mj 。单脉冲雪崩能量额定值 E_{AS} 在 $1800\sim 2500\text{ mj}$ ，COOLMOS 的也是最低的。众所周知，MOSFET 烧毁的原因是寄生在 NPN 管（对于 N 沟 MOSFET）导通诱发 NPN 管二次击穿而烧毁。而雪崩能量额定值是抑制寄生 NPN 管道通的重要参数。 E_{AR} 大幅降低是可靠性降低的重要表现。MOS7-IGBT 没有 E_{AR} 和 E_{AS} ，但是给出了类似于 E_{AR} 的 SSOA，在 600 W 下可达 120 A 的直角安全工作区，直角 SSOA 是 IGBT 可靠性的重要安全曲线。

COOLMOS 雪崩能量额定值下降的原因分析：由图 1 右图可见，COOLMOS 由于 P-Stripe（条）的插进，寄生 NPN 管 N^+ 发射区右侧的 P 区和普通 MOSFET 相比大了好多倍，在雪崩击穿时该区的空间电荷区也大了好多倍。因此雪崩击穿后产生的电子空穴也有数倍的增加。击穿的空穴经发射区下的基区流向源极，其空穴电流为 I_h ，电子流向 MOS 管的漏极。当 $I_h \cdot r_b \geq 0.7\text{ V}$ 时，寄生 NPN 管导通诱发二次击穿。由于 COOLMOS 的 I_h 比普通 MOSFET 的 I_h 大很多，所以 COOLMOS 更容易诱发寄生 NPN 管导通，使 E_{AR} 大大降低。另外，COOLMOS 的 P-Stripe 是经过多次（十几次）反复外延、氧化、光刻和硼离子注入而形成的。多次外延生长、离子注入和扩散势必产生大量的晶格缺陷。大量的晶格缺陷将引起临界电场降低和雪崩倍增电子-空穴的增加，使 I_h 大大增加。COOLMOS 的出现对降低 $R_{DS(ON)}$ 来说，不得不说是功率 MOS 工艺发展上的一次革命，但是繁杂的工艺和结构引起的 E_{AR} 和可靠性降低，又不得不引起使用者的注意。

2. 四种器件应用性能的分析与讨论

表 2 和表 3 时在上述使用条件下, 结合表 1 中的电性能理论计算得出的应用性能。为比较方便各脚标用 1、2、3、4 表示。1 代表 APT5010LVR, 2 代表 APT5010B2LL, 3 代表 APT47N60BC3, 4 代表 APT30GP60B。由表 3 可见四种器件的总功耗: $P_{T1} > P_{T4} > P_{T2} = P_{T3}$ 。 P_{T1} 大是因为其管芯面积最大且热阻小所致。

四种器件的导通和开关损耗为 $P_{C3} < P_{C4} < P_{C1} < P_{C2}$, $P_{S2} < P_{S1} < P_{S4} < P_{S3}$ 。可见 COOLMOS 由于 $R_{DS(ON)}$ 最低, 使 P_{C3} 也最小, 其次是 MOS7-IGBT 较小。 P_S 是 COOLMOS 最大, MOS7 最小。

在使用条件下最高的开关频率: $f_{sm1} > f_{sm2} > f_{sm4} > f_{sm3}$, 结温 $T_{j3} > T_{j4} > T_{j2} > T_{j1}$ 。四种器件的 f_{sm} 都大于 100KHz, 最高者为 MOS5 和 MOS7, 最低者为 COOLMOS。总体来讲, 在上述条件下, 使用四种器件均可满足要求, 结温 T_j 都小于 125°C, $f_{sm} > 100$ KHz。要想看哪种器件最优, 不能光从电性能上看, 好要看其经济性, 要考核其性价比。

3. 工艺和成本的比较分析

半导体器件的生产在相同衬底(外延)的情况下, 芯片面积越大, 工艺难度系数越大, 光刻次数越多, 成本就越高。由表 4 中归一成本可见: COOLMOS 的成本是 MOS7-IGBT 的 1.6 倍, APT5010B2LL 和 APT5010LVR 是 APT30GP60B 的 2.0 和 2.5 倍。可见 MOS7-IGBT 的成本最低。表 4 第五项表明四种器件元胞和栅结构的不同。 APT5010LVR、 APT5010B2LL 和 APT30GP60B 均为叉指元胞和多晶-AL 双层栅结构。而 APT47N60BC3 是六角形元胞和多晶栅结构。多晶-AL 双层栅的栅信号是 AL 传输的, 多晶栅的栅信号是由多晶硅传输的。对于高压功率 MOS 器件来讲, 驱动器要输出大脉冲电流给输入电容 C_i 充电。多晶硅单层栅的内栅电阻较大, 容易产生局部导通造成烧毁。

五、结论

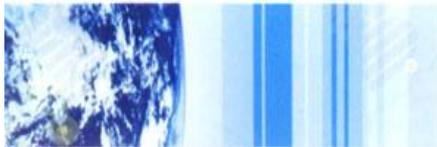
从上面四种 SMPS 器件电性能的比较和在相同应用条件下的计算表明: COOLMOS 最大的优点是 $R_{DS(ON)}$ 低和导通损耗小, 在四种器件中 f_{sm} 最低, 结温 T_j 最高。同时重复雪崩能量额定值降到普通 MOSFET 的 1/50, 加上多层单晶栅结构, 使其成为四种器件中可靠性最差的。

MOS7-IGBT 是用超高速低功耗 MOS7 工艺生产的一种高速 IGBT, 其性能可与

COOLMOS 媲美。而且可靠性高、拖尾时间短和成本低的特点，在 $f_s < 100$ KHz 的应用领域中代替 MOSFET 可谓性价比最高的产品。

参考文献：

- [1] ADVANCED POWER TECHNOLOGY, 4Q02-REGIONAL SALES MEETING SMPS TRANSISTORS
- [2] L.LORENZ, INFINEON TECHNOLOGIES, “ COOLMOS, A NEW APPROACH TOWARDS AN IDEAL POWER SWITCH ”



北京时代新晨电子科技有限公司

Beijing Brilliance Time Electric Technology Co., Ltd.

北京市海淀区海淀大街38号银科大厦10层1010室

Rm. 1010, Silver Tech Tower, No. 38, Hai Dian Street, Hai Dian District, Beijing

TEL: 86-10-8288 6423, 6424, 6427, 6429 FAX: 86-10-8288 6422