

目前，随着全球节能减排碳中和的发展趋势，开关电源对系统效率的要求越来越高，为了满足效率的要求，MOSFET 以其开关速度快，导通电阻低等优点在开关电源领域中得到了广泛应用，如电源适配器、LED 驱动器，工业电源、服务器电源等均广泛地应用了 MOSFET。在低电压，高电流的应用中，如果电源系统的次级使用二极管进行整流，由于其存在 0.7V 左右的压降，这将造成很大的功率损耗，达不到能耗的要求。为了提升电源的整流效率，可以使用 MOSFET 代替二极管进行整流，由于 MOSFET 低至仅仅几个毫欧的 $R_{ds(on)}$ ，将使得开关电源的效率大大提升。

因此，本文以双管正激电路 (Two Forwards) 拓扑为例，对次级同步整流 MOSFET 的选取、应用中应注意的问题作了详细的介绍和分析，从而为设计工程师提供一些依据，来找到系统设计的一些问题，提高电子系统的可靠性。

✧ 功率 MOSFET 与传统二极管的比较

MOSFET 因为导通电阻低，所以其导通状态的伏安特性曲线斜率较小；反之，二极管的阻抗较大，其 V_F-I_F 曲线更加陡峭，如图 1 所示。MOSFET 作为同步整流的优点主要有以下几点：

- **效率：**同步整流通常比异步整流更高效，因为它使用与开关频率同步的控制信号来控制整流器件（通常是 MOSFET）。
- **控制方式：**在同步整流中，整流器件的开关是与电源的开关频率同步的，这意味着整流器件的导通和关断与电源的开关动作是协调的。
- **损耗：**由于同步整流使用 MOSFET 作为整流器件，其导通电阻 ($R_{ds(on)}$) 较低，从而减少了导通损耗。
- **应用：**同步整流常用于低电压、大电流的应用，如便携式电子设备的充电器和电源适配器。

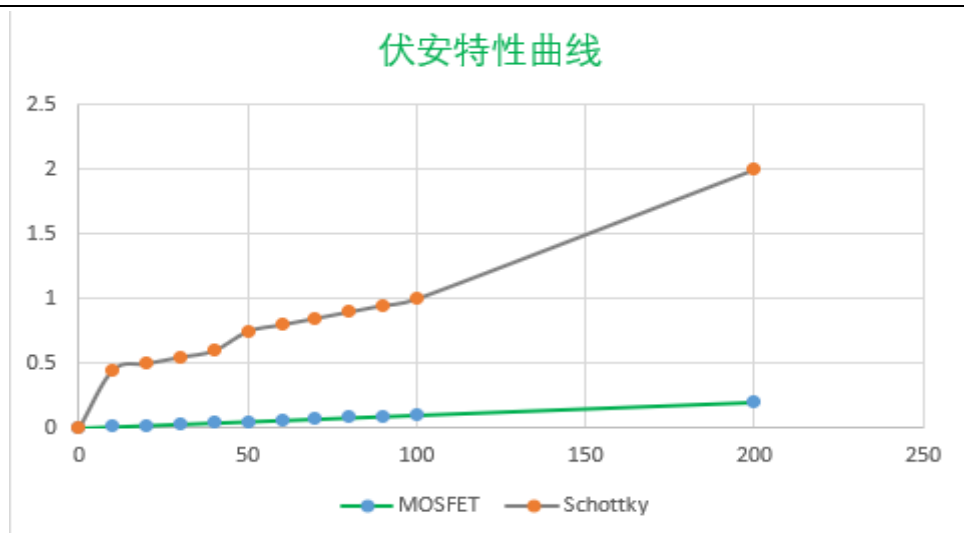


图 1 伏安特性曲线

✧ 同步整流的工作原理

同步整流的工作原理主要基于使用导通电阻非常低的功率 MOSFET，来取代整流二极管，以降低整流损耗，提升系统效率。这项技术可以大大提高 DC/DC 变换器的效率，并且不存在由肖特基势垒电压而造成的死区电压。

如图 1 所示为传统的二极管构成的整流电路。

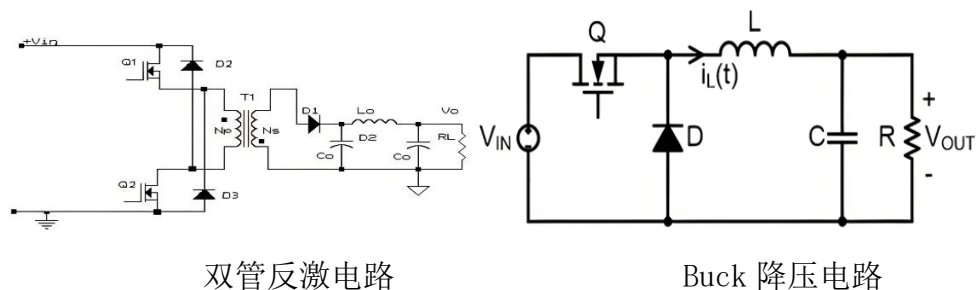


图 2 传统的二极管整流

如图 2 所示为功率 MOSFET 构成的整流电路。

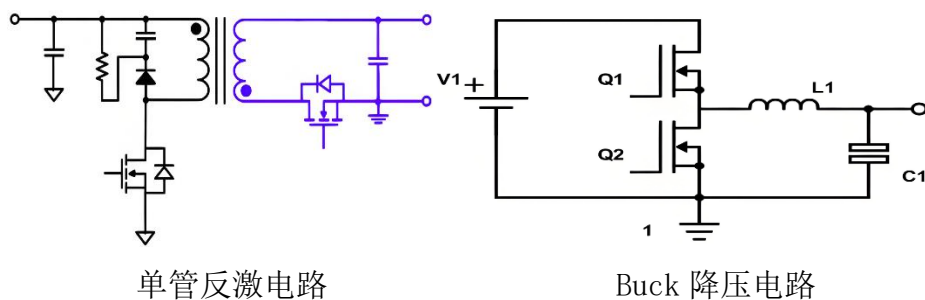


图 3 MOFFET 同步整流

✧ SiNESEMI SMT3001BLP 在双管正激屏显电源中的应用

双管正激电源其拓扑电路结构图，如图 4 所示：

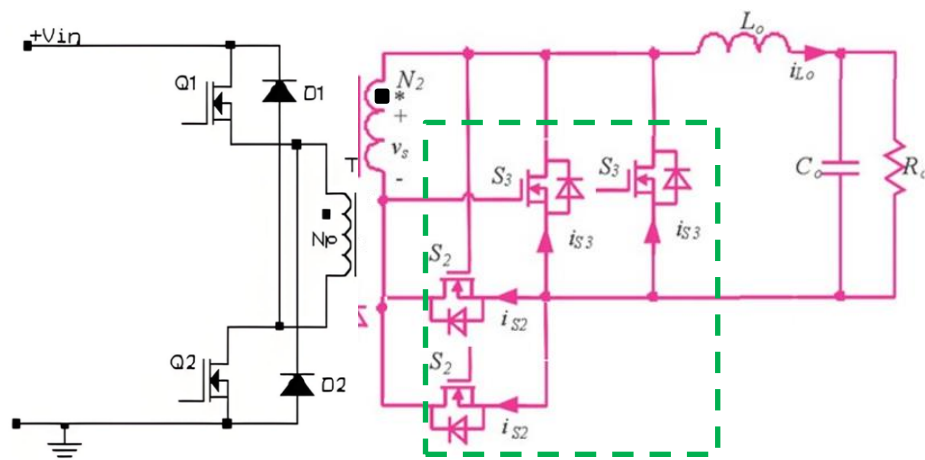


图 4 双管正激电路

测试条件如下：

系统输入电压为交流 220V，输出电压为直流 5V/60A，300W 输出功率。

与友商的 MOSFET 技术参数对比如下：

技术参数	SMT3001BLP	友商 A
VDS	30V	30V
Rds(on)	1.8mΩ@4.5V	2mΩ@4.5V
Crss	72pF	117pF
Qg	21nC	19nC
Qrr	40nC	57nC
FOM	37.8	38
Vgs(th)	1.7V	1.7V
Package	PDFN5060	PDFN5060

- ◆ 测试场景 1：在没有散热片的情况下，测试 5 分钟，实验室测试图片如图 5 和图 6：

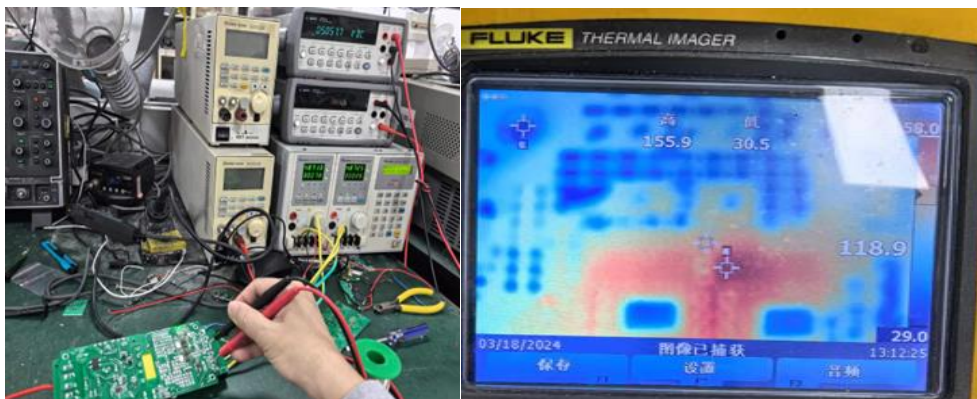


图 5 SMT3001BLP 测试

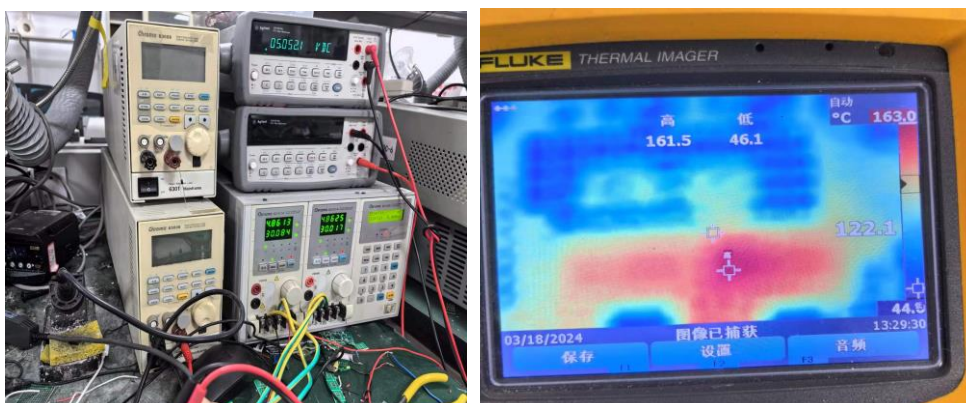


图 6 友商 A 测试

测试结果如下：

Para. P/N	输入电压 (VAC)	频率	输出电压 (V)	输出电流 (A)	输出功率 (W)	输入功率 (W)	效率	5 分钟裸板测试 MOS 温度
SMT3001BLP	220	100KHZ	5.0577	60.104	303.988	341.12	89.11%	155.9°C
友商 A	220	100KHZ	5.0521	60.101	303.6363	342.98	88.53%	161.5°C

- ◆ 测试场景 2：在加装散热片的情况下，测试 30 分钟，实验室测试图片如图 7 和图 8：

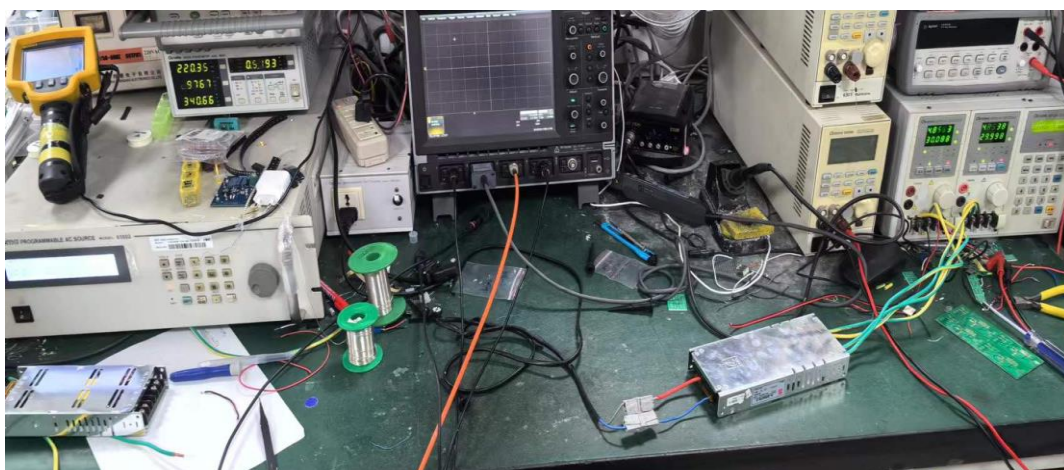


图 7 SMT3001BLP 测试

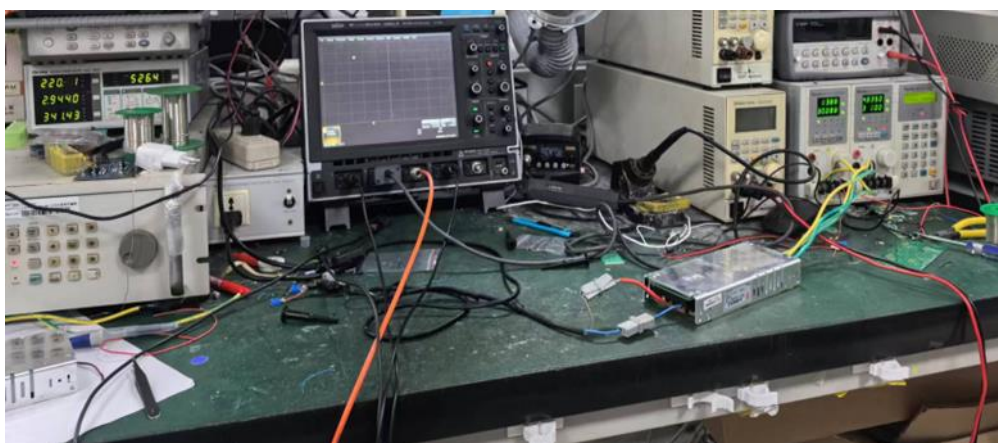


图 8 友商 A 测试

测试结果如下：

Para. P/N	输入电压 (VAC)	频率	输出电压 (V)	输出电流 (A)	输出功率 (W)	输入功率 (W)	效率	30 分钟散热片测 试 MOS 温度
SMT3001BLP	220	100KHZ	5.0577	60.78	303.9	340.66	89.21%	
友商 A	220	100KHZ	5.0521	60.7	303.5	341.43	88.21%	

◆ 对比测试结论：

相比传统的二极管整流，MOSFET 整流大大降低了功率损耗，提升了系统的整体效率；在散热条件一般的情况下，开关电源的效率接近 90%。另外， $R_{ds(on)}$ 比友商 A 少 $0.2m\Omega$ ，在 SiNESEMI 的 FOM 值与友商 A 几近相同，同等测试情况下，系统的效率比友商高，器件的壳温比友商 A 低。很重的一个原因，在高频开关电源中，次级同步整流 MOSFET 体二极管反向恢复电荷 Q_{rr} 低，可以大大降低开关损耗，提升系统整体效率。

- ◆ 我们的应用工程师在实验室做电源测试的时候，做过一个统计，开关电源在 100KZ 以上时，MOSFET 的开关损耗占整个 MOSFET 损耗的比重较大。因此，MOSFET 的开关性能以及体二极管的反向恢复性能，在同步整流这种电路拓扑中，对系统整体效率起到了非常关键的作用。

	SMT6012ALPD		SMT6012ALPD		SMT6012ALPD
门极驱动电压 V	5	MOSFET 导通电阻 (mΩ) (RDS(on)max.@Tj=25°C)	0.0028	MOSFET 两端电压 VDS (V)	5
门极驱动电荷 QG	5.9E-09	MOSFET 工作电流 ID(A)	60	MOSFET 工作电流 ID(A)	60
电路工作频率 fsw	1000000	MOSFET 导通时间 Ton	0.0000001	MOSFET 开通上升时间 Trise	0.0000002
门极驱动损耗 PG	0.01475	电路工作频率 fsw	100000	MOSFET 开通上升时间 Tfall	0.0000002
		MOSFET 导通损耗 Pc(W)	0.1008	电路工作频率 fsw	100000
				MOSFET 开关损耗 Psw(W)	6
MOSFET 总损耗 P	6.11555				

☆ 怎么选择一款优秀的 MOSFET 做整流器呢？

- 正激电源中二次整流侧 MOSFET 需承受的反向耐压为 $U_{in(max)} * N_2/N_1$ ，一般选取 2 倍的安全裕量；
 - 低导通电阻 $R_{ds(on)}$ ；
 - 关注体二极管的性能；
- ✓ 从 MOSFET datasheet 可以获取体二极管的动态参数如下：

Drain-Source Diode Characteristics ⁽⁷⁾		SMT3001BLP				
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$I_F = 20A, dI/dt = 100A/\mu s, T_J = 25^\circ C$	-	42	-	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}	$T_J = 25^\circ C$	-	40	-	nC
Diode Forward Current	I_S	$T_C = 25^\circ C$	-	-	122	A
Diodes Forward Voltage	V_{SD}	$I_S = 2.0A, V_{GS} = 0V$	-	0.7	1.2	V

- ✓ 体二极管的反向恢复曲线：

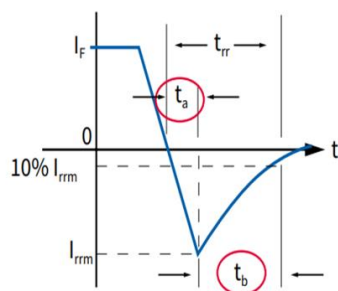


图 9 软恢复

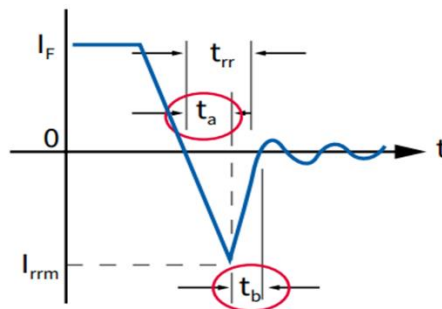


图 10 硬恢复

- 二极管的软特性因素 $S\text{-factor} = t_b/t_a$, 这个参数定义了二极管反向恢复过程中, 电压的应力以及 EMI 的性能;
 - 二极管的反向恢复峰值 I_{rrm} 越小, $d(I_{rrm})/dt$ 越小, EMI 效果越好。
- *SMT3001BLP datasheet* 如下:

<https://www.sinesemi.com/product/MOSFET/pdf/SMT3001BLP.pdf>

重要通知

对本文档的内容，SiNESEMI 公司不作任何形式的明示或暗示的保证，包括但不限于对特殊目的的适销性和适合某一特定用途的暗示保证（以及等同性质的任何司法管辖区的法律）。

SiNESEMI 公司及其子公司有权利对文档进行修改、增强、改进、更正或其他更改，而无需进一步告知本文档以及本文档所述任何产品的变化。SiNESEMI 公司不承担本文件或本文件所述任何产品的应用或使用本文件所产生的任何责任；SiNESEMI 公司也不根据其专利或商标权向用户授权任何许可，也不授以其他人的权利。任何使用本文件或本文件中所述产品的用户应承担此类使用的所有风险，并同意维护 SiNESEMI 公司和任何使用 SiNESEMI 公司网站上产品的所有公司的权利，使其免受损失。

SiNESEMI 公司不保证或接受任何有关透过未经授权的销售渠道购买的产品造成的法律责任。

如果客户购买或使用 SiNESEMI 公司的产品用于任何意外或未经授权的应用中，客户应保障并赔偿 SiNESEMI 公司及其成员受到的债务、破坏、成本和费用，包括但不限于索赔、诉讼或任何原因造成的法律程序中产生的法律费用，使其免受直接或间接因这种意外或未经授权的应用造成有关的任何人身伤害或死亡索赔。

生命支持

SiNESEMI 公司的产品在未经 SiNESEMI 公司首席执行官的明确书面批准下，不得作为生命维持装置或系统的关键部件而使用。仅使用如下：

A. 生命维持装置或系统是指以下设备或系统：

1. 为了植入体内，或
2. 支持或维持生命，如果按照标签中所提供的使用说明正确使用，也有可能对使用者造成重大伤害。

B. 关键部件是指生命维持装置或系统中的部件，其操作失效可以被合理地预期到，它会导致生命维持装置的失效或影响其安全性或有效性。

客户陈述在生命支持设备或系统的安全和监管影响方面拥有所有必要的专业知识，承认并同意他们完全对与其产品有关的所有法律、监管和安全方面的要求，以及在这种对安全性要求苛刻的生命维持设备或系统中 SiNESEMI 公司产品的任何使用进行负责，尽管 SiNESEMI 公司可能提供任何与设备或系统有关的信息或支持。此外，客户必须保障并赔偿 SiNESEMI 公司及其成员因使用 SiNESEMI 公司产品而造成的任何损害，包括在对安全性要求苛刻的生命维持设备或系统中使用所造成的任何损害。

版本号@2024, SiNESEMI 公司

研发中心一应用技术部