



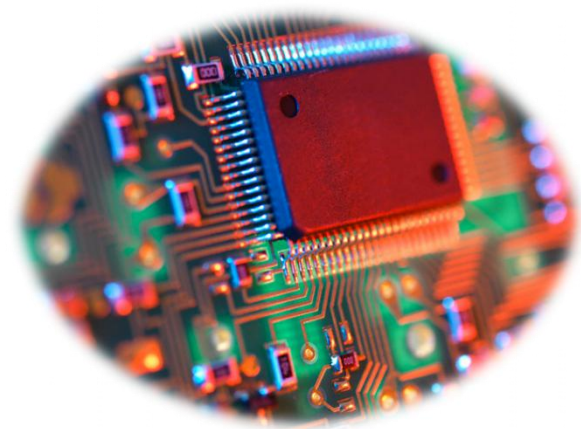
安森美半导体
ON Semiconductor®

FAN6248 – 先进的同步整流控制器 用于LLC谐振转换器

安森美半导体
ON Semiconductor®



- 1. 简介
- 2. FAN6248产品概览
- 3. 竞争方案比较
- 4. 工具与资源
- 5. 总结



1. 简介

- 什么是同步整流 (SR)
- 同步整流用于LLC谐振转换器的技术挑战

什么是同步整流 (SR)?

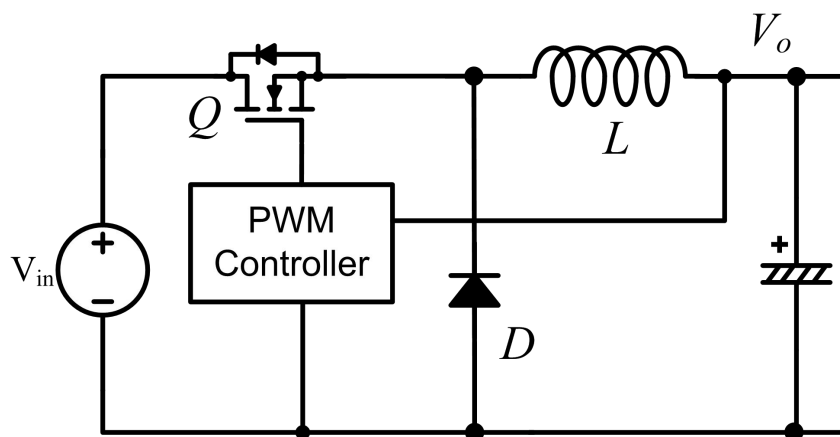
▪ 什么是同步整流?

- 取代二极管整流器 → MOSFET
- 类似二极管工作

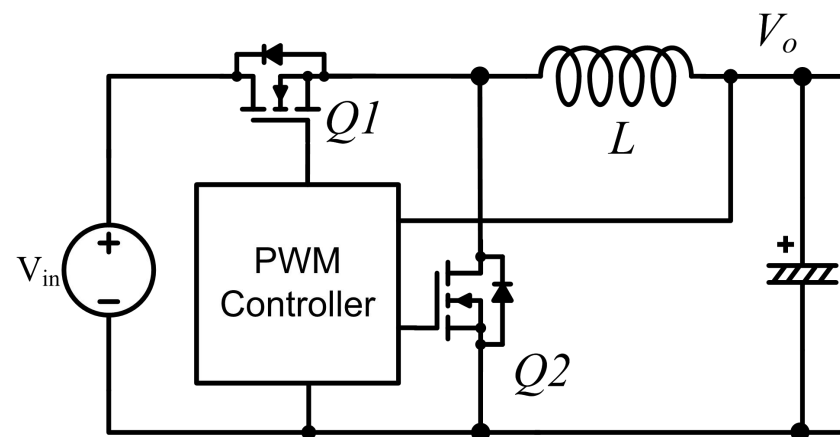
▪ 同步整流的优势

- 整流器两端低压降 → 更低导通损耗 → 更高能效
- 低的 V_{OUT} 和高的 I_{OUT} 应用: 效益更大
- 并联同步整流MOSFET: 更高电流能力

非同步降压



同步降压

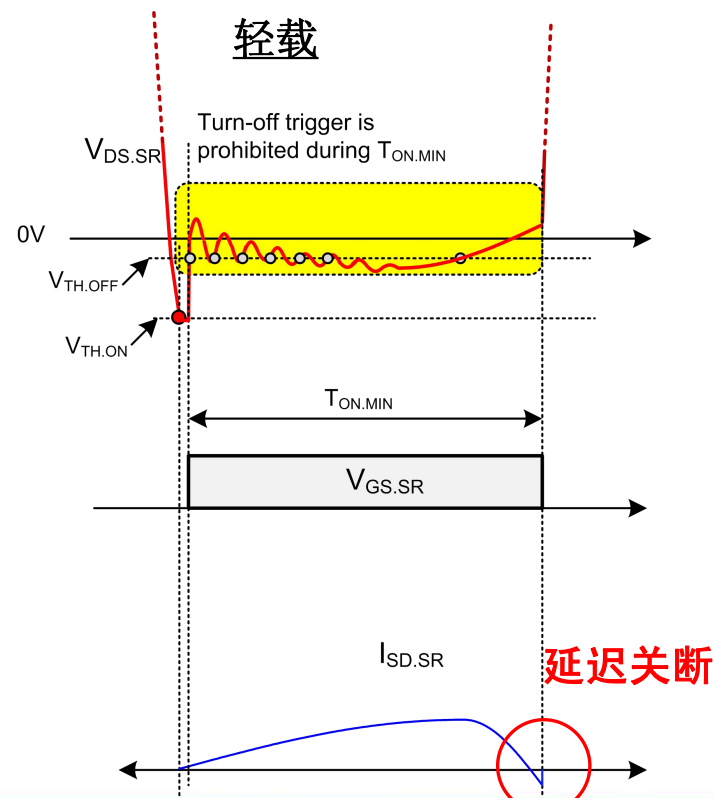
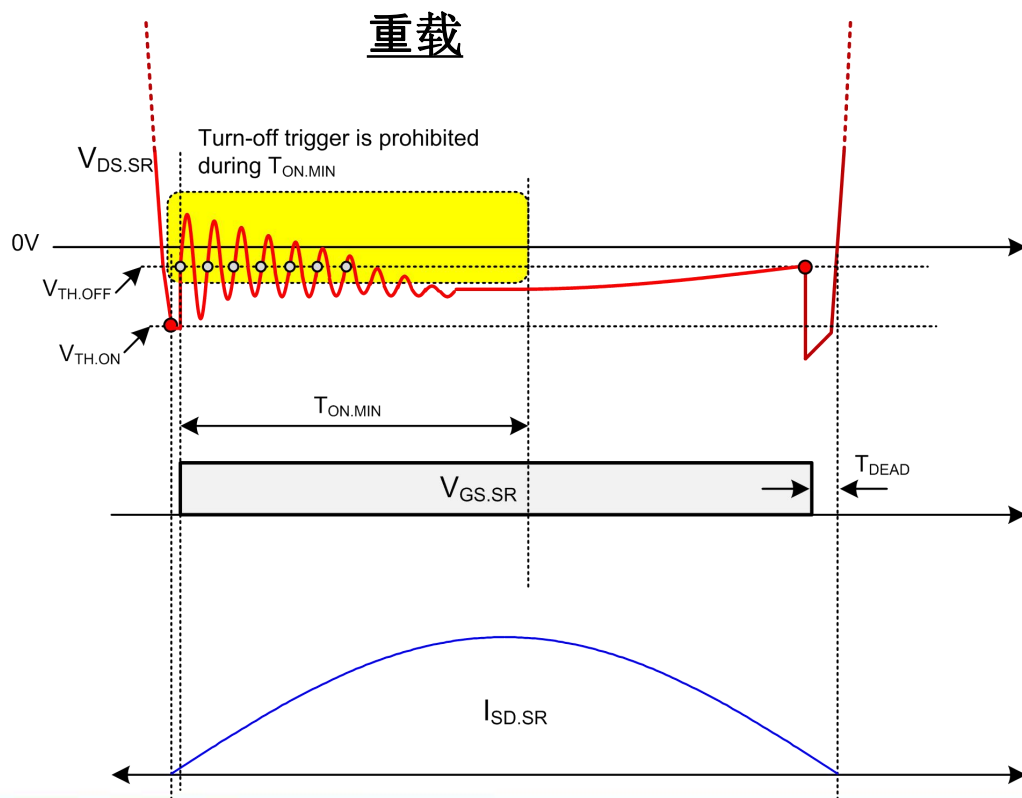


同步整流用于LLC谐振转换器的技术挑战(1)

最小的导通时间设置：由于不同工作频率造成困难

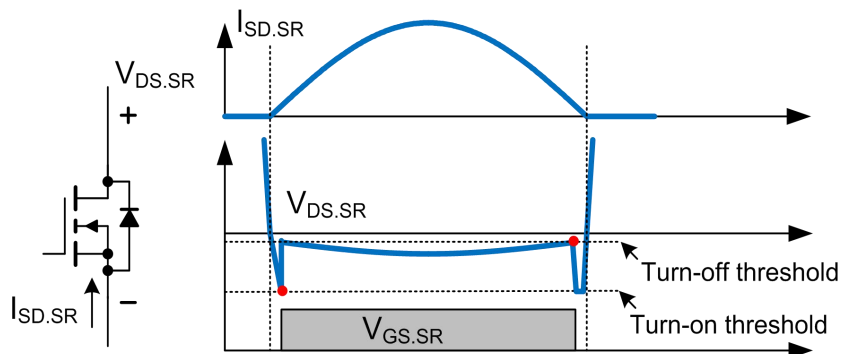
- 太大的 $T_{ON.MIN}$ → 轻载时延迟关断同步整流
- 太小的 $T_{ON.MIN}$ → 重载时由开关噪声导致异常关断

→ 需要自调节的 $T_{ON.MIN}$

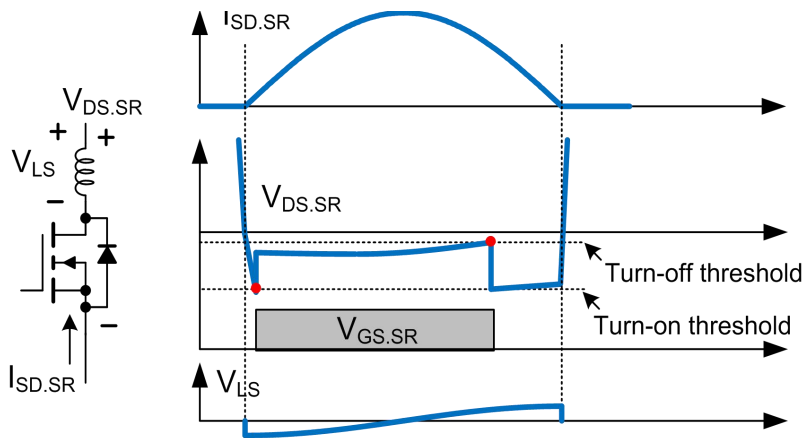


同步整流用于LLC谐振转换器的技术挑战(2)

无杂散电感



有杂散电感



$$V_{DS.SR} = -I_{SD.SR} \times R_{DS.ON} - L_{Stray} \cdot \frac{di_{SD.SR}}{dt}$$

■ 过早的同步整流关断：由于杂散电感

杂散电感

→ 同步整流关断时的正偏置 V_{LS}

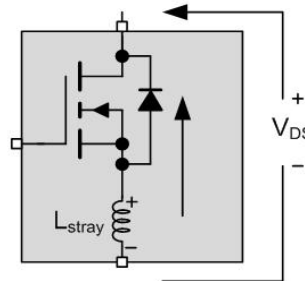
→ 过早的关断同步整流

→ 固定的 $V_{th.off}$ 导致较长的本体二极管导通，

→ 导通损耗↑

– 不同的 di/dt , $L_{stray} \rightarrow \Delta V_{DS.SR} \uparrow$

需要自调节的 $V_{th.off}$



Package Type	L_{SOURCE} (pH)
TO-220	9000
D2PAK	5000
IPAK	4000
DPAK	3000
S08	1000

Figure 5. Effect of stray inductance on drain-to-source voltage of SR MOSFET

同步整流用于LLC谐振转换器的技术挑战(3)

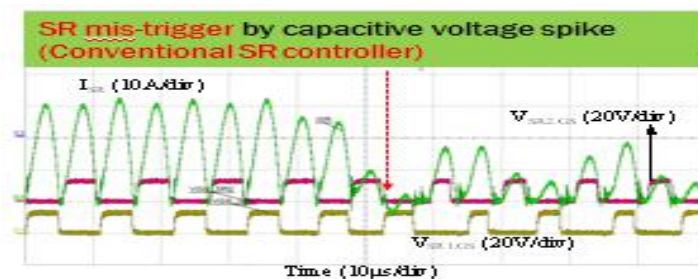
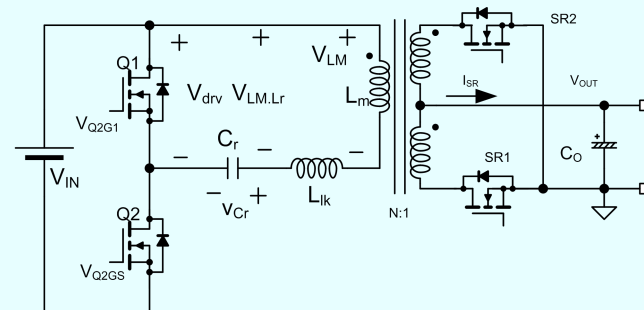
■ 在轻载条件下同步整流电流反向

– 轻载条件

- 谐振电容电压幅值: **不是足够大**
- 激磁电流向**谐振电容充电**
- 在充电期间MOSFET开关转换, 产生**电容电流尖峰**
- **同步整流电流延迟**
 - 如果在转换期间由电容电流尖峰开启同步整流
- **同步整流电流反向**

需要自调节的延迟开启同步整流

$$\frac{L_m}{L_m + L_{lk}} (V_{IN} - V_{Cr}) > nV_{OUT}$$

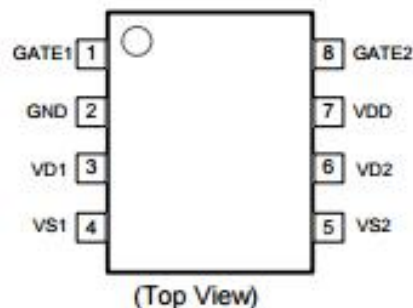
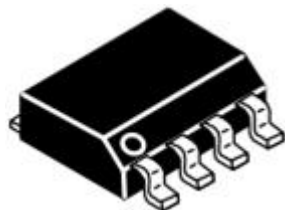


2. 产品概览

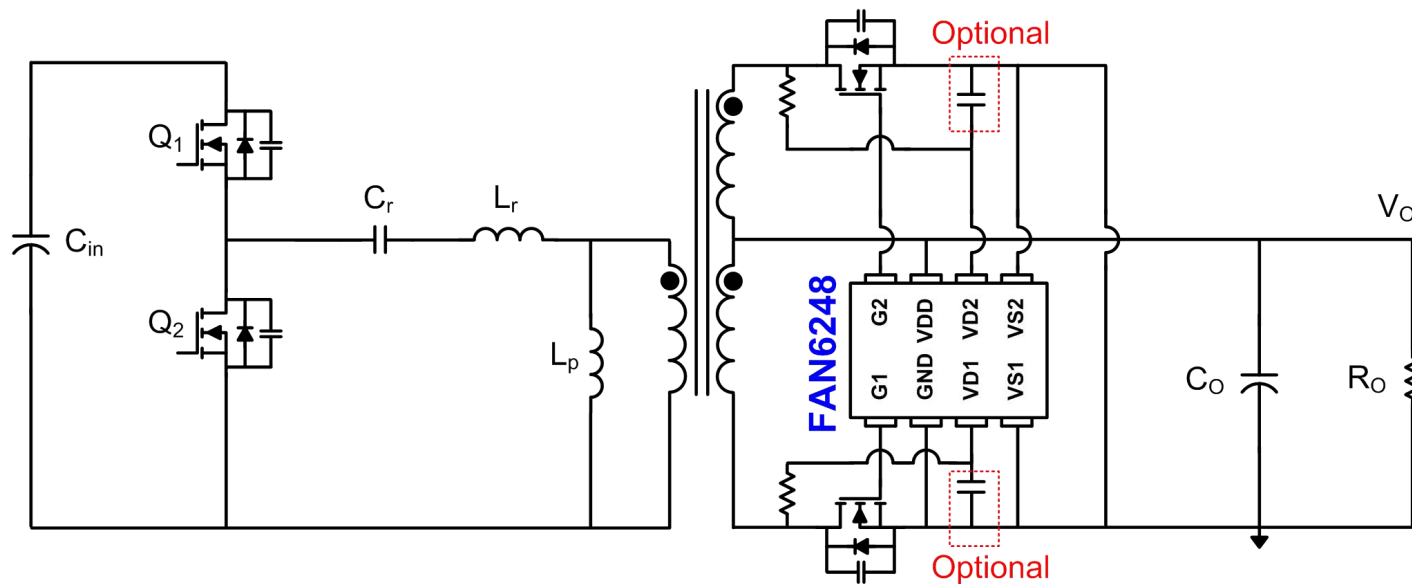
- 关键特性
- 典型应用电路
- 内部框图
- 自調節死区时间控制
- 自調節最小导通时间控制
- 防止同步整流电流反向
- 節能模式
- 产品选择指南

关键特性

- 高度集成的独立控制 → 最少外部元件数
- 反击穿控制 → 可靠的同步整流工作
- 各同步整流MOSFET的漏源电压的单独的100 V额定值检测输入
→ 专有的 V_{D1} , V_{D2} , V_{S1} , V_{S2} 引脚
- 自調節死区时间控制补偿寄生电感 → 最小化本体二极管导通和最大化能效
- 同步整流电流反向检测= 电容电流尖峰检测, 及轻载检测(LLD)
→ 轻载条件下安全和稳固的运行
- 自調節最小导通时间 → 易于设计且更抗噪的导通特征
- 工作电压范围: 达30 V
- 低启动和待机电流
- 最大工作频率: 从25kHz 到700 kHz
- SOIC-8 封装
- 高驱动输出电压: 10.5 V
→ 可驱动所有MOSFET 频段到最低的 $R_{DS(on)}$
- 在節能模式下的低工作电流: 典型值350uA

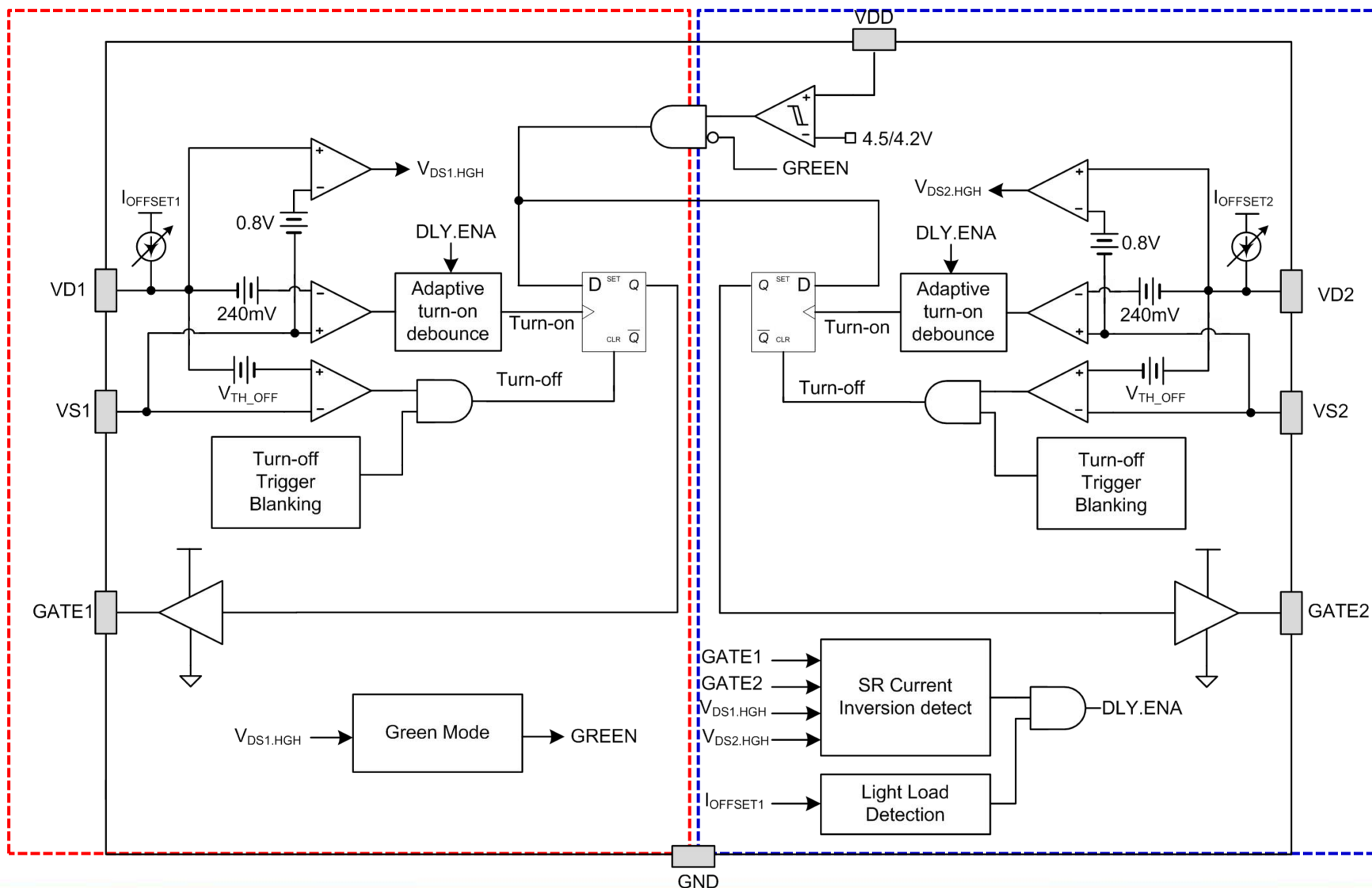


典型应用电路

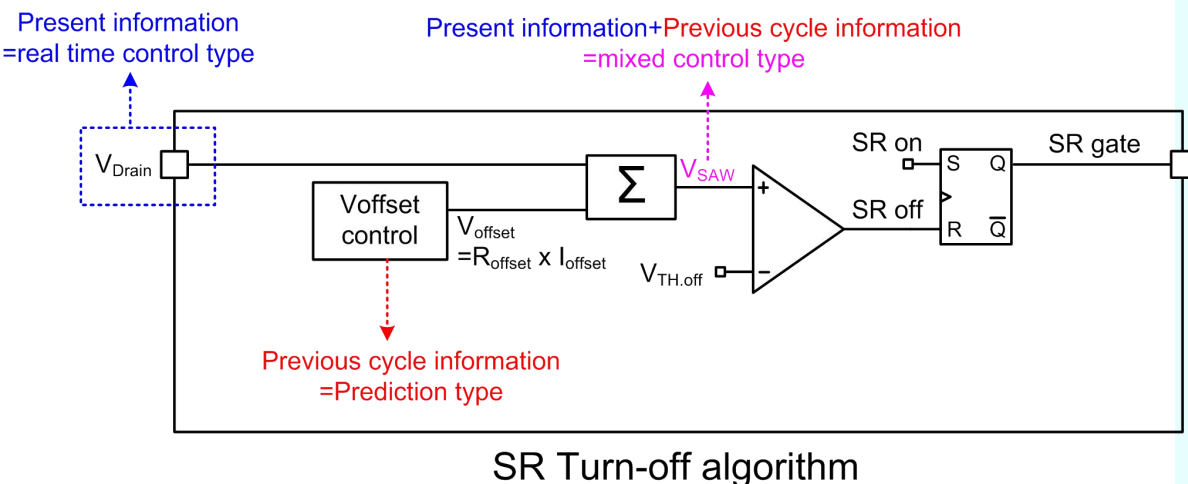


- 极简单的配置：2 个电阻
- 2 个电容：严重噪声系统时可能需要
- 元件数少

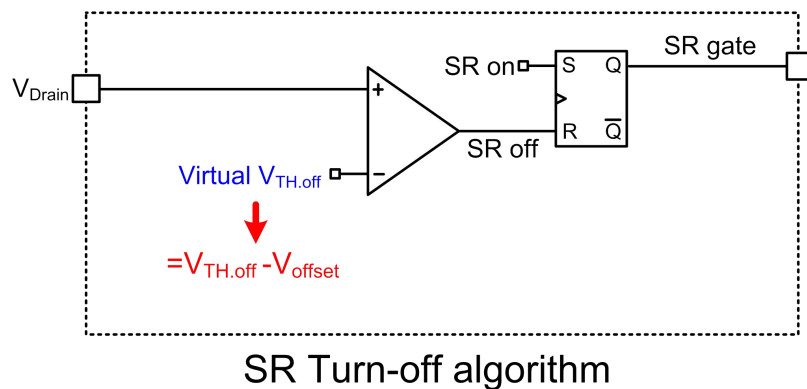
内部框图



同步整流关断算法



↓ **Simplified circuit**



同步整流关断：混合类型

V_{Drain} ：即时信息

→ 实时控制类型

+

Voffset：前一周期的信息

→ 预测类型

= 混合型控制

虚拟 $V_{TH,OFF}$ ：变化以使

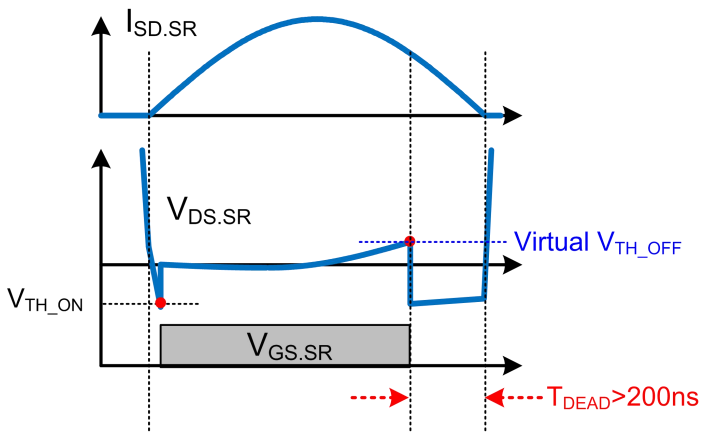
$T_{DEAD}=200ns$

V_{Drain} 对比

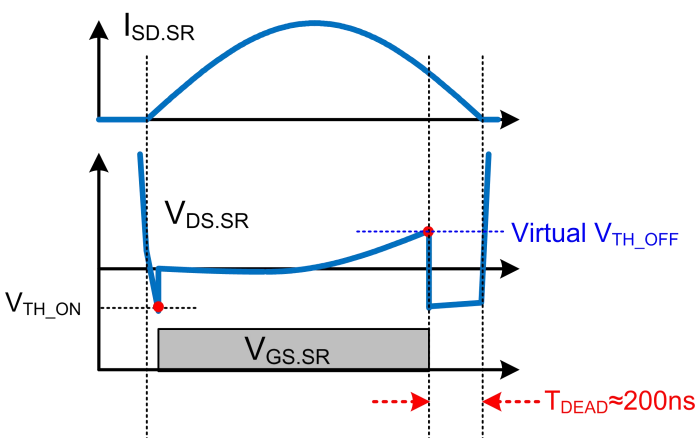
虚拟的 $V_{TH,OFF}$

自调节死区时间控制

若 $T_{DEAD} > 200ns$



↓ 虚拟的 $V_{TH_OFF} \uparrow$



▪ T_{dead} : 保持在约200ns

→ 与输出负载无关, L_{stray}

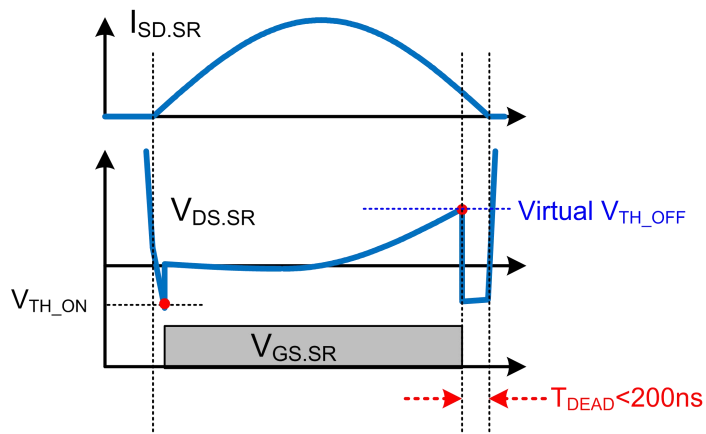
→ 通过 V_{offset} 控制

→ 若 $T_{dead} > 200ns \rightarrow V_{offset} \downarrow$

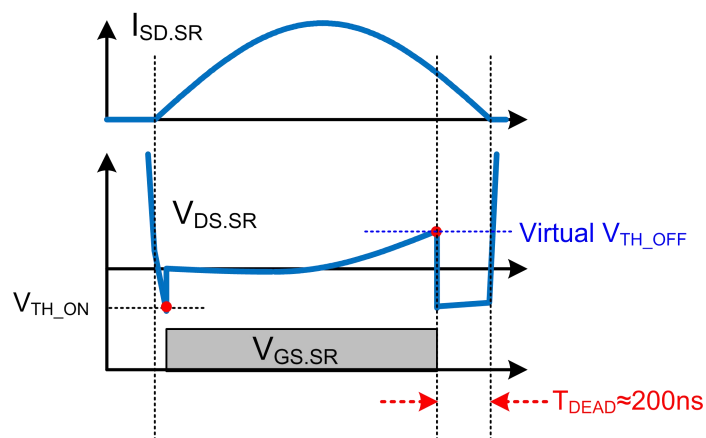
→ 虚拟的 $V_{TH_OFF} \uparrow \rightarrow T_{dead} \downarrow$

自调节死区时间控制

若 $T_{DEAD} < 200ns$



↓ 虚拟的 $V_{TH_OFF} \downarrow$



▪ T_{dead} : 保持在约200ns

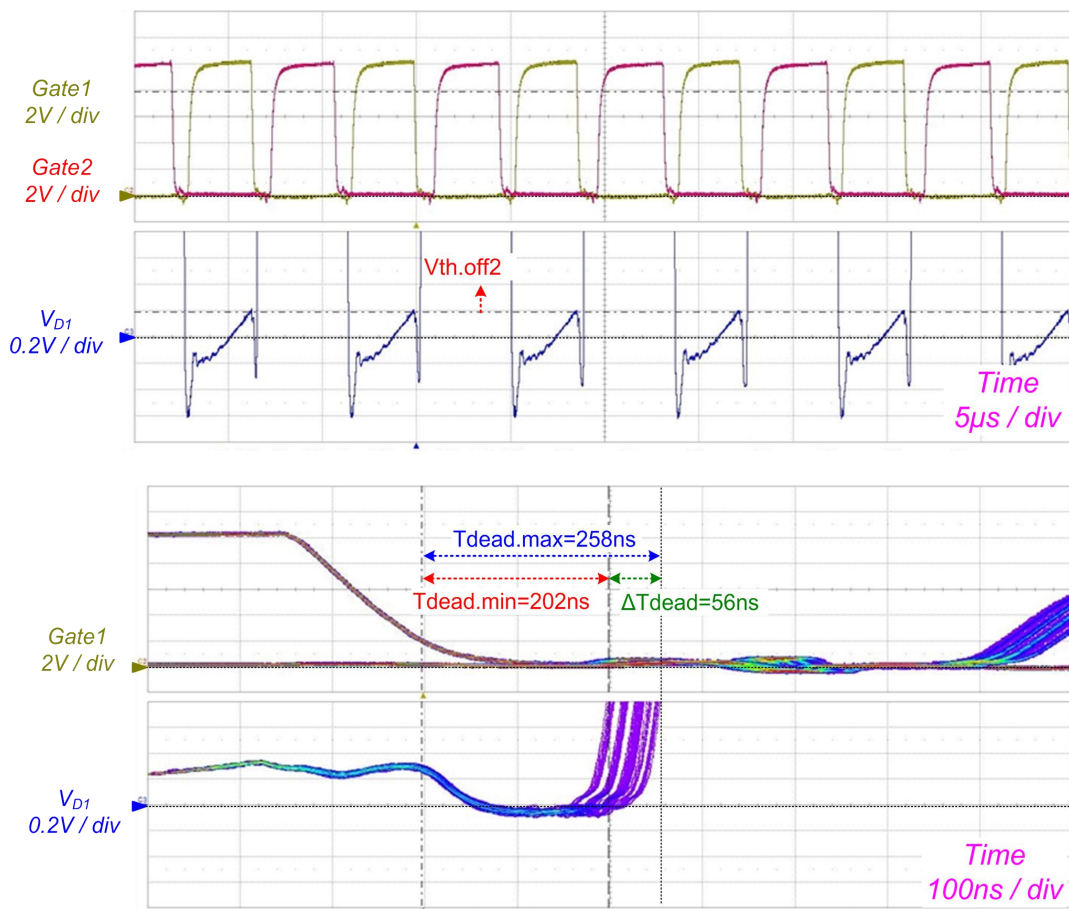
→ 与输出负载无关, L_{stray}

→ 通过 V_{offset} 控制

→ 若 $T_{dead} < 200ns \rightarrow V_{offset} \uparrow$

→ 虚拟的 $V_{TH_OFF} \downarrow \rightarrow T_{dead} \uparrow$

自调节死区时间控制



- 2 个关断阈值电压:

$$V_{th.off1} < V_{th.off2}$$

- $V_{th.off2} = 228mV$ (重载时)

→ 添加 16 steps V_{offset} 到 V_{D1}

- T_{dead} : 保持在约 200ns

→ 与输出负载无关, L_{stray}

→ 通过 V_{offset} 控制

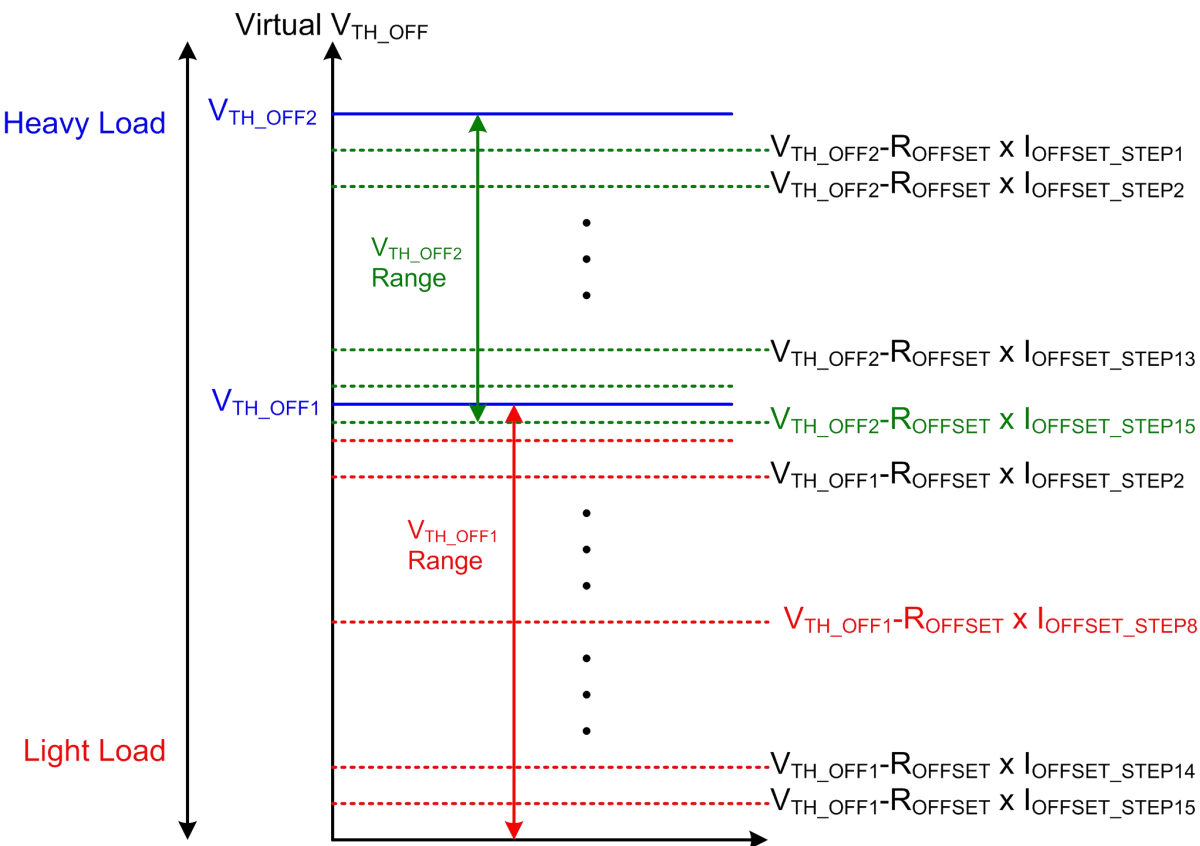
→ 若 $T_{dead} < 200ns \rightarrow V_{offset} \uparrow \rightarrow T_{dead} \uparrow$

→ 若 $T_{dead} > 200ns \rightarrow V_{offset} \downarrow \rightarrow T_{dead} \downarrow$



自调节 T_{DEAD} 控制

自调节的 V_{TH_OFF} 变化



▪ V_{TH_OFF} : 2 steps

$V_{TH_OFF1} = 130\text{mV}$, $V_{TH_OFF2} = 228\text{mV}$

虚拟的 $V_{TH_OFF} = V_{TH_OFF} - V_{offset}$ 可变的

▪ V_{TH_OFF} 变化:

若 I_{OFFSET_STEP0} & $T_{DEAD} > 250\text{ns}$

→ 不能通过 V_{OFFSET} 增加虚拟的 V_{TH_OFF}

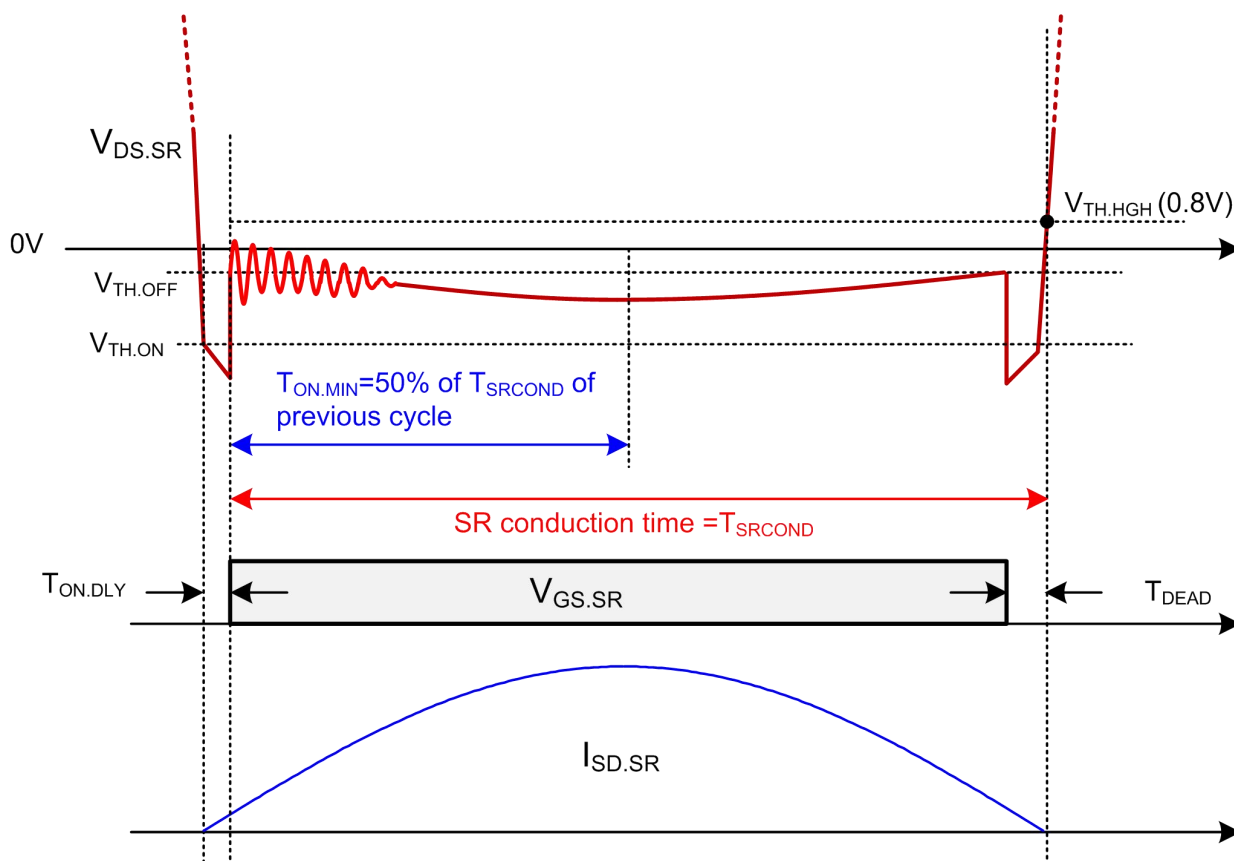
→ $V_{TH_OFF(K)}$ 变为 $V_{TH_OFF(K+1)}$ & I_{OFFSET_STEP15}

若 I_{OFFSET_STEP15} & $T_{DEAD} < 250\text{ns}$

→ 不能通过 V_{OFFSET} 降低虚拟的 V_{TH_OFF}

→ $V_{TH_OFF(K)}$ 变为 $V_{TH_OFF(K-1)}$

自调节最小导通时间控制



▪ 同步整流导通时间 T_{SRCOND} :

从 同步整流关断
到 $V_{DS.SR} = V_{TH.HGH}$

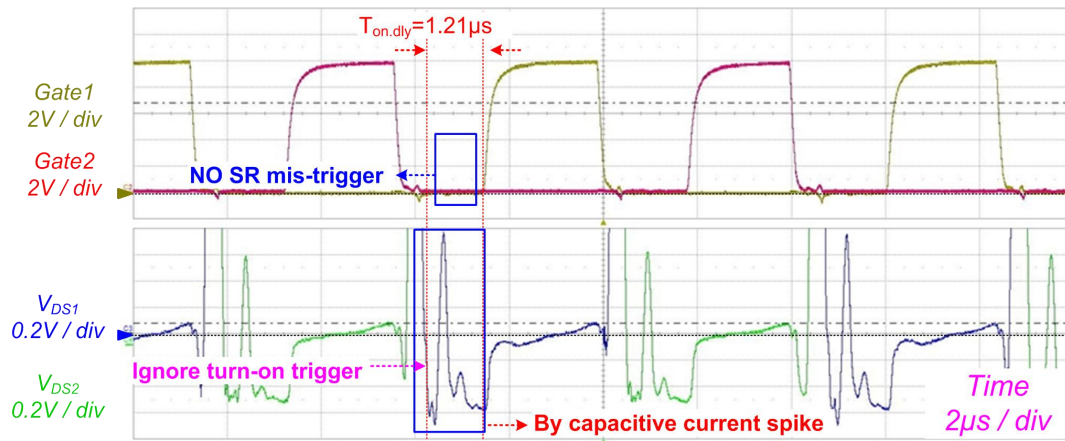
▪ $T_{ON.MIN} = 50\% \text{ of } T_{SRCOND}(n-1)$

- 用上一周期信息

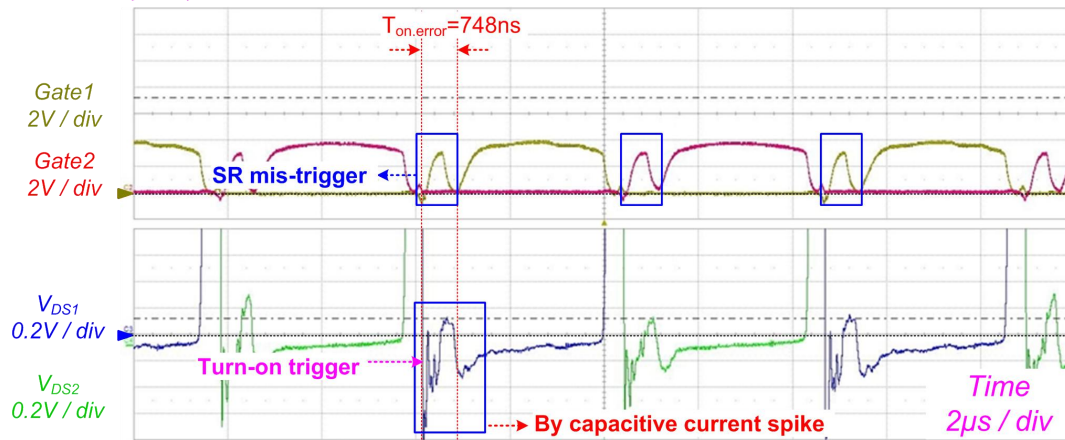
自调节 $T_{ON.MIN}$ 控制

防止同步整流电流反向

FAN6248HA



竞争对手N



■ FAN6248

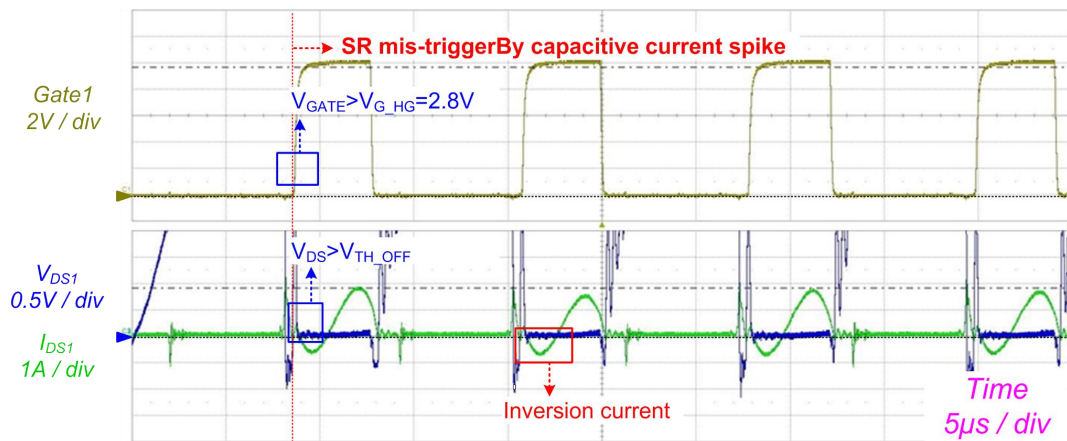
- 在电容电流尖峰时忽略由漏极压降导致的导通触发
- 无SR误触发
- 防止电流反向

■ 竞争对手N

- 由电容电流尖峰引起的压降开启同步整流
- SR误触发
- 可能引起电流反向

同步整流电流反向检测

在轻载条件下的SR误触发



SR电流反向检测触发



▪ 当 SR 电流反向

→ SR 误触发

→ $V_{GATE} > V_{G_HG} = 2.8V$ &
 $V_{DS} > V_{TH_OFF}$

→ 因此, 若 $V_{GATE} > V_{G_HG} = 2.8V$
& $V_{DS} > V_{TH_OFF}$

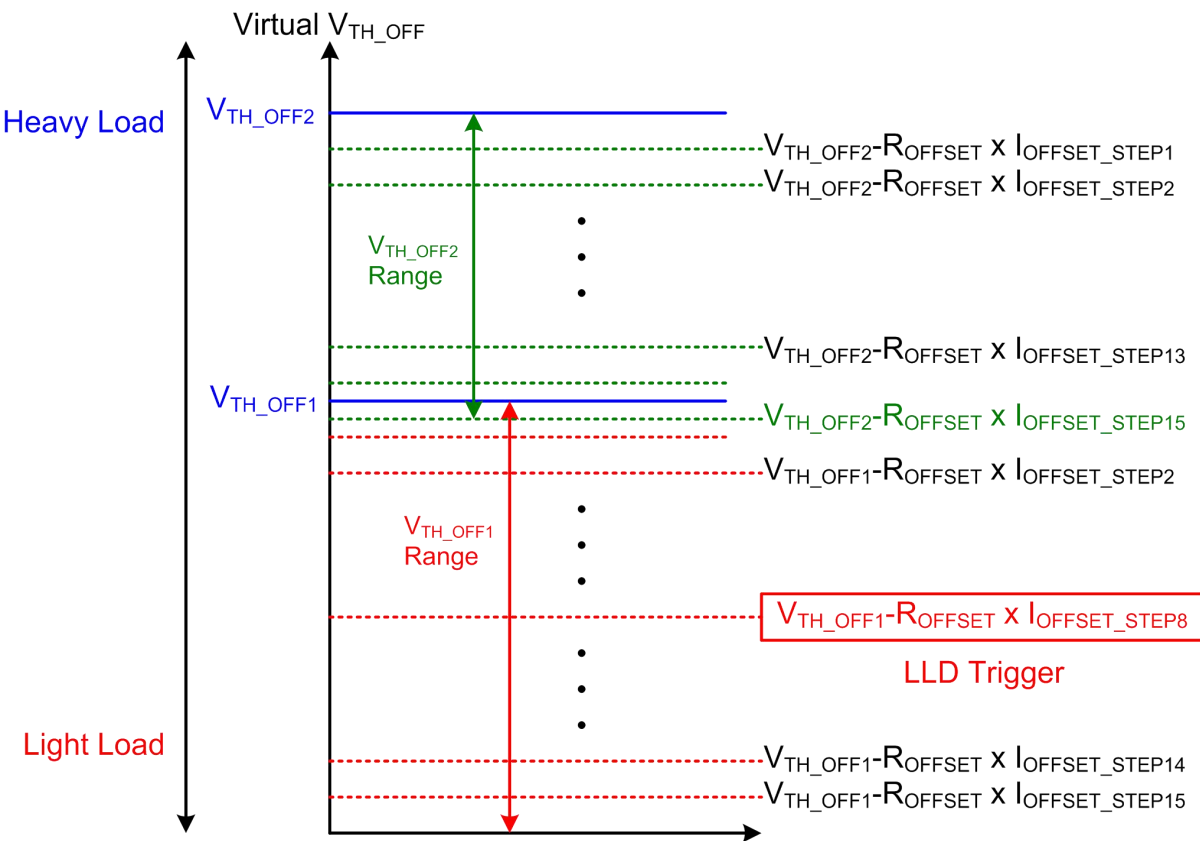
→ SR 电流反向检测

→ $T_{ON_DLY} \uparrow$ 从 80ns 到
380ns/680ns

自检管理法

(Post management method)

轻载检测 (LLD)



■ 轻载检测

V_{TH_OFF} & I_{OFFSET_STEP}

→ 代表输出负载条件

Ex) V_{TH_OFF2} & I_{OFFSET_STEP1}

→ 重载条件

Ex) V_{TH_OFF1} & I_{OFFSET_STEP15}

→ 极轻载条件

■ LLD 触发:

V_{TH_OFF1} & I_{OFFSET_STEP8} (25% 的控制范围)

→ LLD 触发

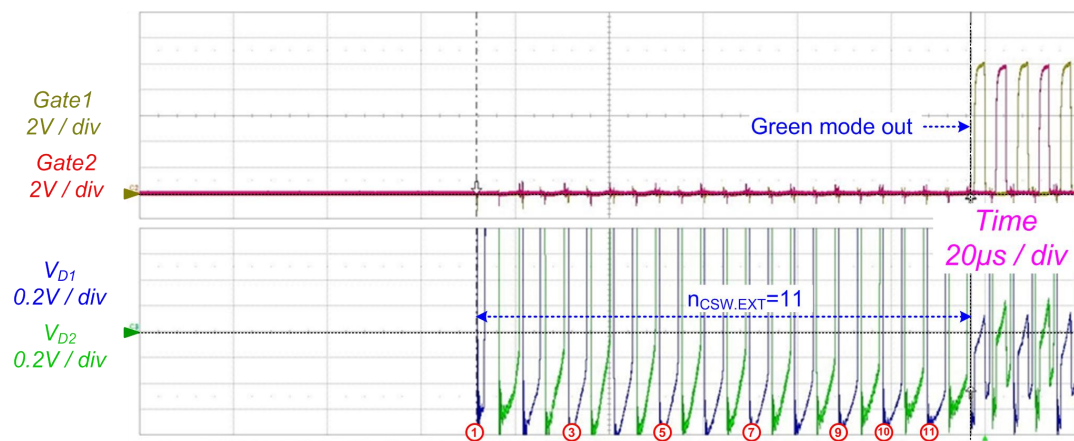
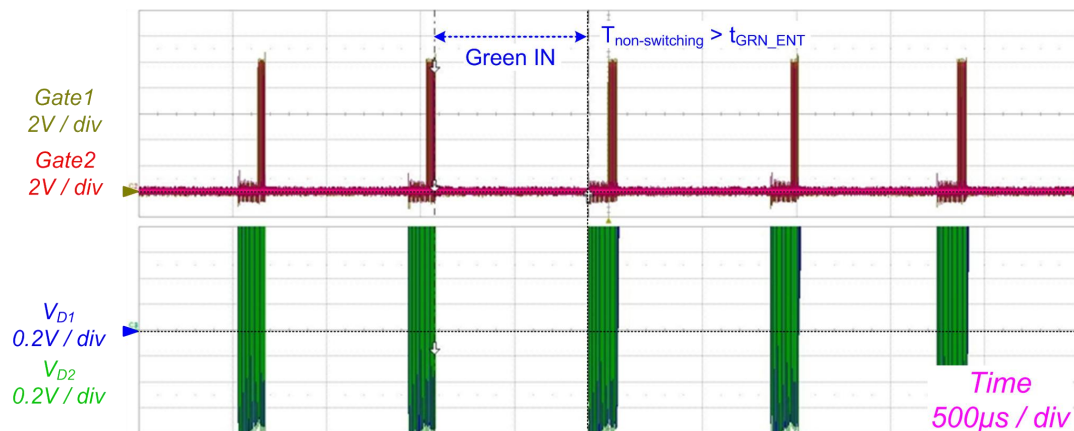
→ $T_{ON_DLY} \uparrow$ to $380ns = T_{ON_DLY2}$

& $T_{DEAD} \uparrow$ to $250ns = T_{DEAD_LIGHT}$

预警法

节能模式

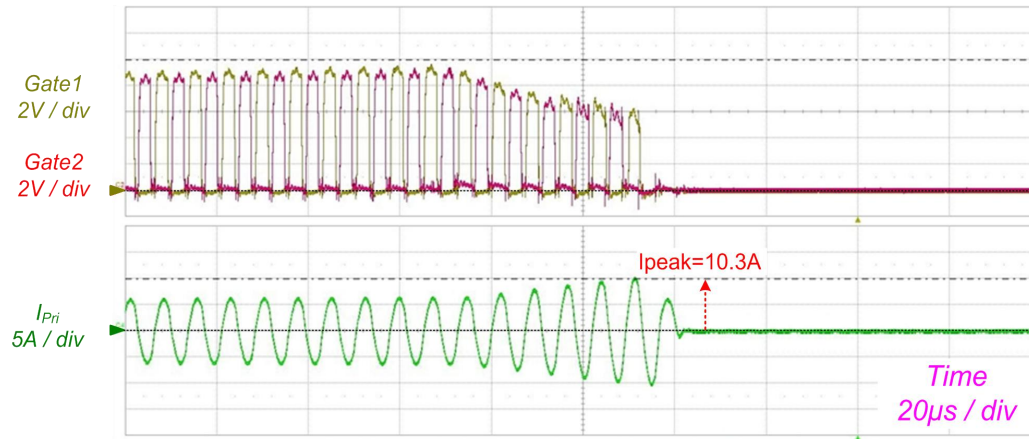
$V_{in}=390V_{dc}$, $V_o=12V$, $I_o=1A$



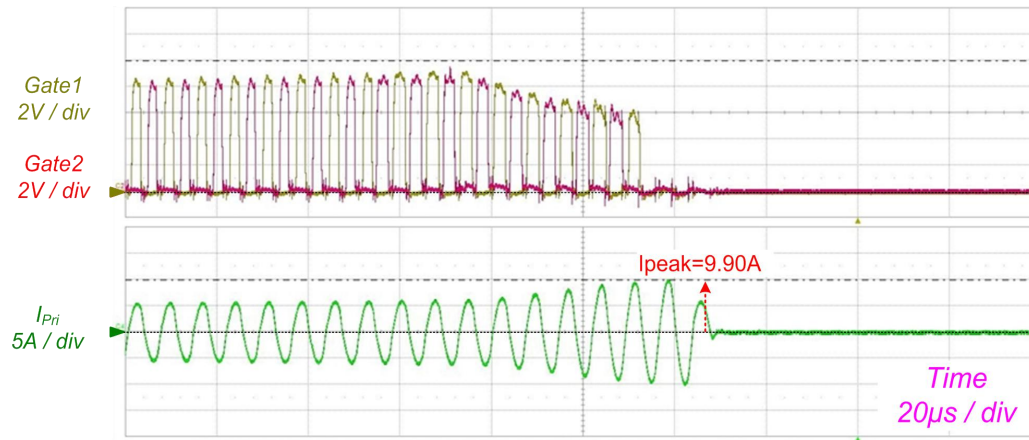
- 节能模式: $I_{OP}=350\mu A$
→ 极低功耗
- 节能模式输入条件:
在LA、LB的420μs时无开关
在HA、HB的240μs时无开关
- 节能模式输出条件:
11个连续的开关周期

异常测试(输出短路)

$V_o=12V$, $I_o=20A$, $R_{offset}=680\Omega$, $C_{d1,2}=open$, then LOAD short



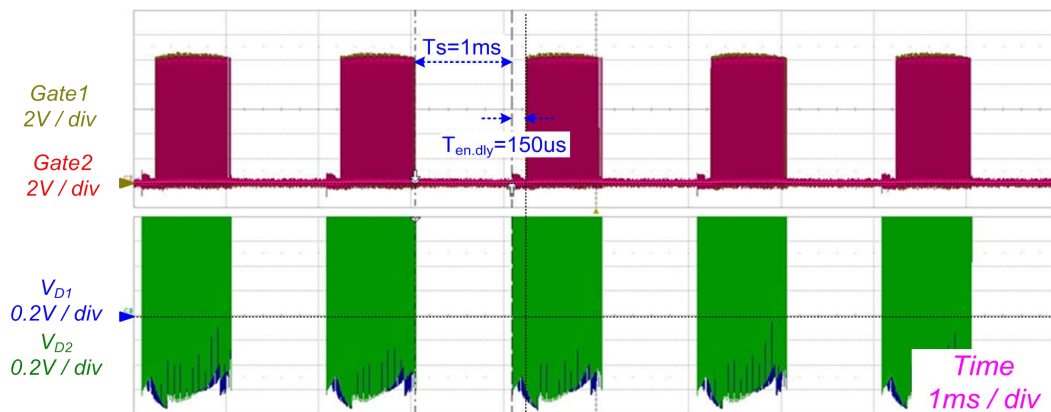
$V_o=12V$, $I_o=10A$, $R_{offset}=680\Omega$, $C_{d1,2}=open$, then LOAD short



- 输出短路@ 重载和轻载条件:
 - 无异常
 - SR适当关断

异常测试 (负载导通/关断)

$V_o=12V$, $I_o=0A \leftrightarrow 10A$, $R_{offset}=680\Omega$, $C_{d1,2}=open$, LOAD on/off



- $I_o=0A \leftrightarrow 10A$ 负载导通/关断, $f_s=1kHz$

→ 开关延迟=150us

→ 无异状

产品选择指南

$V_{th.off1}/V_{th.off2}=130mV/228mV$

→ 用于高 di/dt 及高 L_{stray} 的 SR MOSFET

→ 示例:

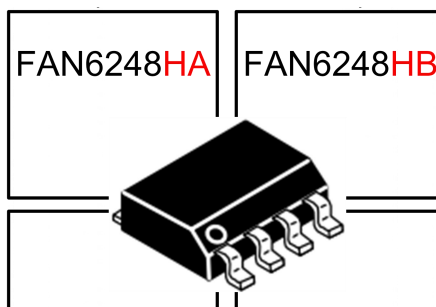
T0220 或 D2-Pak 封装的 SR MOSFET

$V_{th.off1}/V_{th.off2}=100mV/175mV$

→ 用于低 di/dt 及低 L_{stray} 的 SR MOSFET

→ 示例:

PQFN或D-Pak封装的SR MOSFET



Item	HA	HB
V_{TH_OFF1}	130mV	100mV
V_{TH_OFF2}	228mV	175mV

3. 竞争方案比较

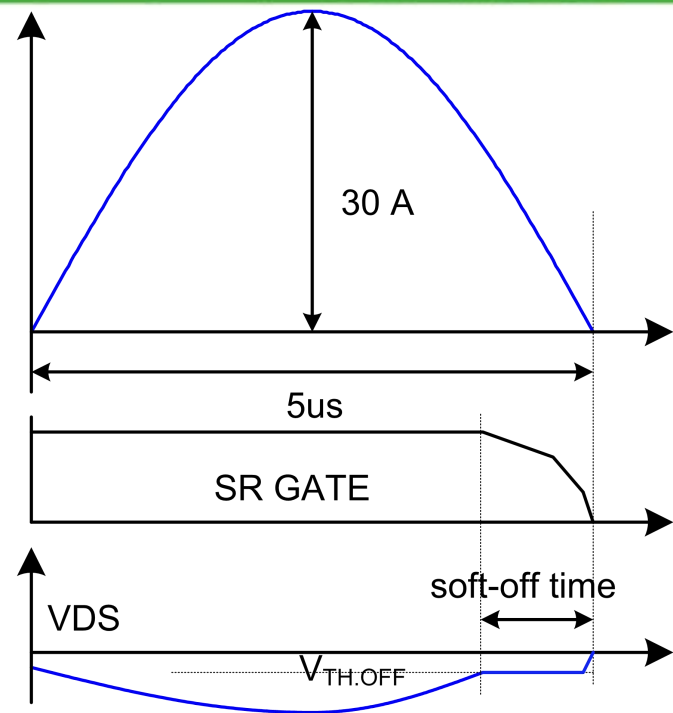
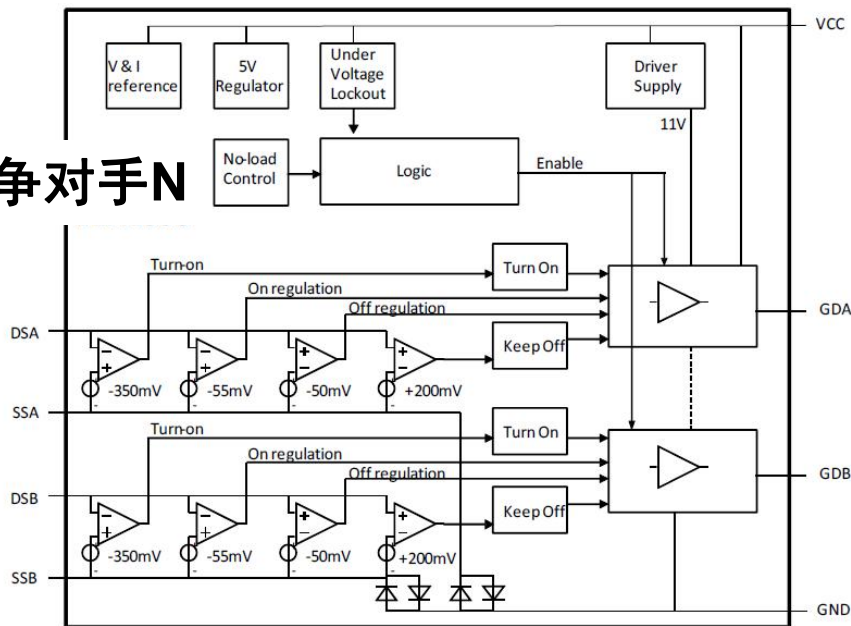
- 关键参数比较
- 分析竞争对手的软关断SR控制
- 分析竞争对手的关断时间控制
- 实验波形
- 能效比较

关键参数比较

	竞争对手M	竞争对手S	竞争对手N	ON FAN6248
$V_{TH.ON}$	-250mV	-100mV	-350mV	-240mV
$V_{TH.REG}$	-70mV	N/A	-55mV	N/A
$V_{TH.OFF}$	0V	N/A	-50mV	0V ~228mV (Adaptive)
$T_{ON.MIN}$	1us	N/A	N/A	200ns ~ adaptive
$T_{OFF.MIN}$	1.6us	N/A	N/A	200ns
Max. V_{DS} sensing	180V	90V	100V	100V
$V_{DD.ON}/V_{DD.OFF}$	6.0V/5.0V	4.5V/4.25V	4.5V/4.2V	4.5V/4.2V
V_{DD} Max	26V	32V	40V	30V
Gate Drive Current	0.1A source 3A sink	0.35A source 4A sink	1A source 1.2A sink	0.7A source 1.4A sink
Gate Clamping	14V	11V	11V	10.5V
Max freq	300kHz	500kHz	500kHz	700kHz
Green mode current	600uA max.	700uA	170uA typ.	350uA typ.
Package	SOIC8 SOIC8E SOIC14	SSOP10	SO8	SOIC8

分析软关断SR控制

竞争对手N



- 漏极电压: SR 关断时通过 V_{gate} 控制稳定在 $V_{th.off}$
- 自然的增加 $R_{DS.ON}$ → 缺点: 导通损耗↑
- 软关断SR控制
- 竞争对手N, 竞争对手M

分析关断延迟控制

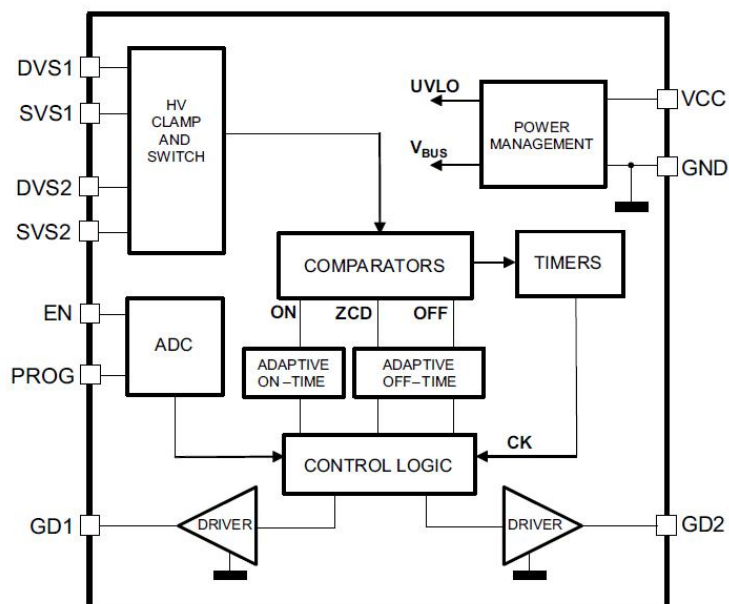
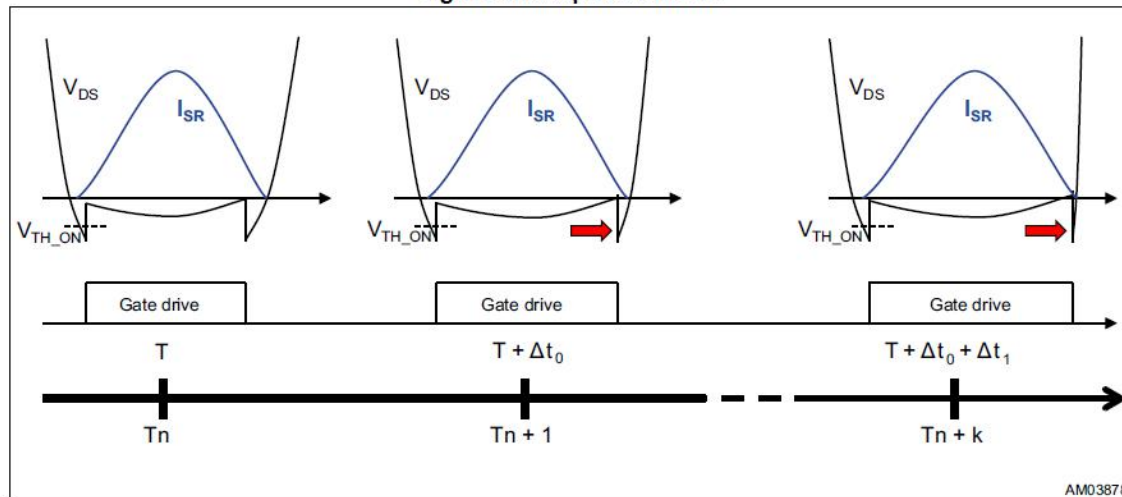


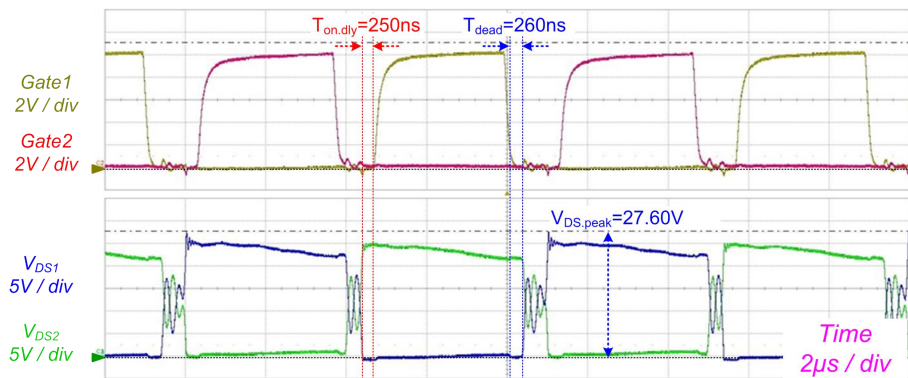
Figure 8. Adaptive turn-off



- 首个SR被关断：启动期间50%的时钟周期
- 逐渐增加关断延迟 → 缺点：窄覆盖范围
- 自调节关断延迟控制
- 竞争对手S

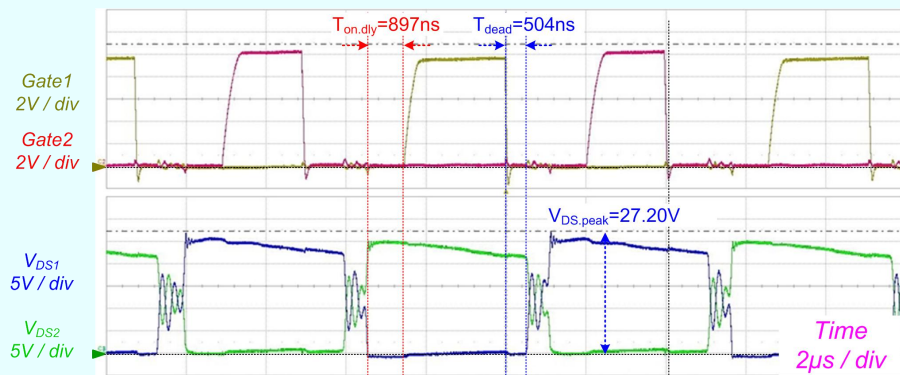
实验波形(100%负载)

FAN6248 EVT1



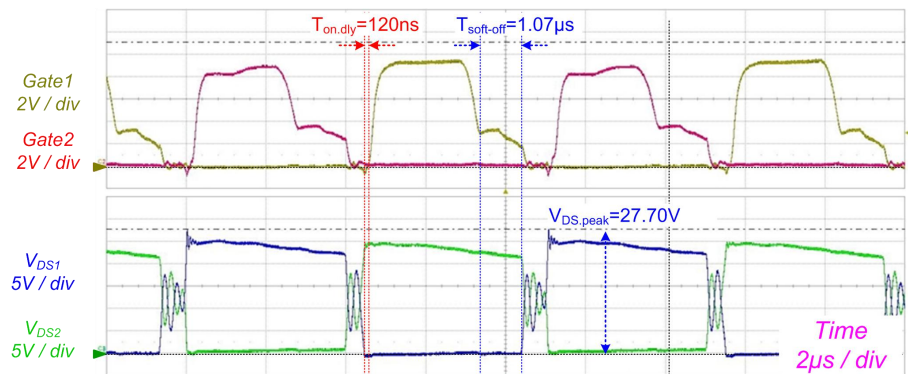
▪ $T_{on,dly}$: 小, T_{dead} : 小

竞争对手S



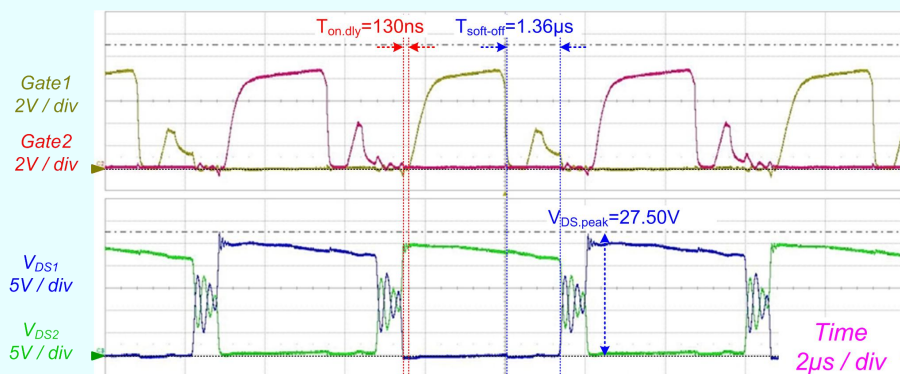
▪ $T_{on,dly}$: 大, T_{dead} : 大

竞争对手N



▪ $T_{on,dly}$: 小, $T_{soft-off}$: 大

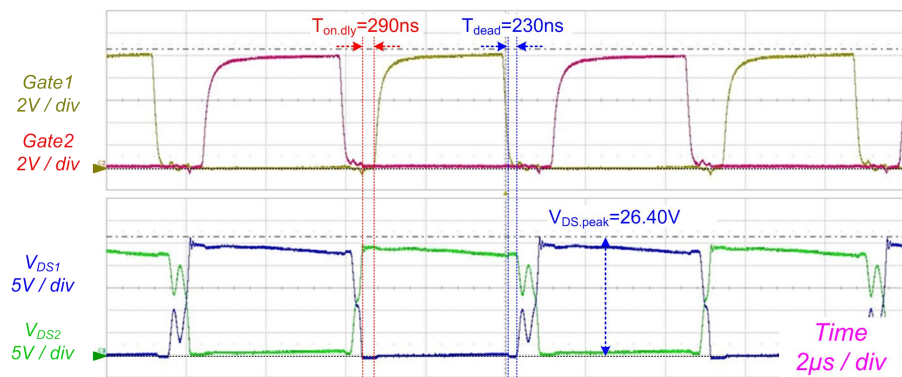
竞争对手M



▪ $T_{on,dly}$: 小, $T_{soft-off}$: 大

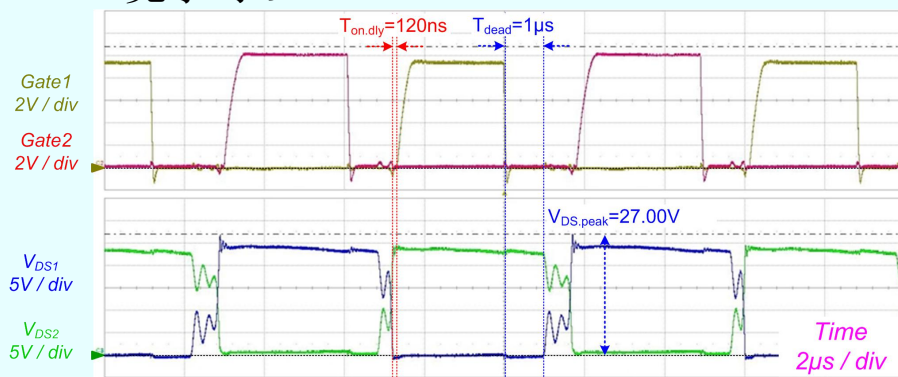
实验波形(50%负载)

FAN6248 EVT1



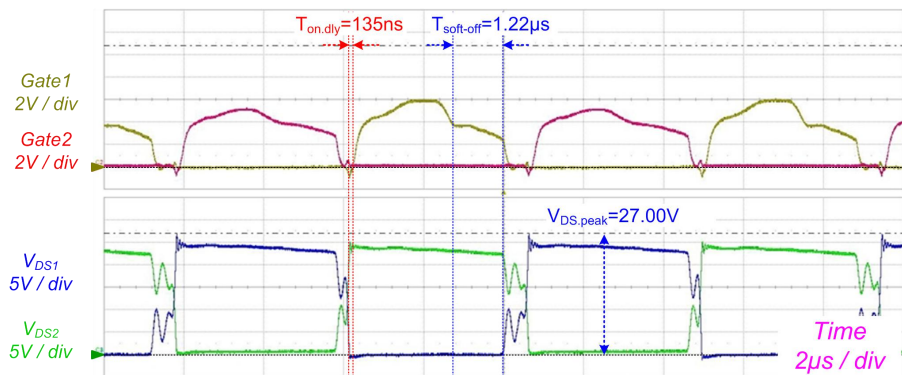
▪ T_{on,dly} : 小, T_{dead} : 小

竞争对手S



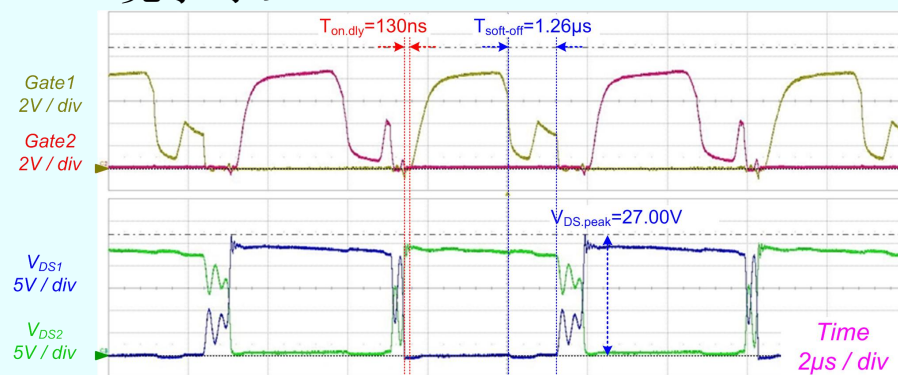
▪ T_{on,dly} : 小, T_{dead} : 大

竞争对手N



▪ T_{on,dly} : 小, T_{soft-off} : 大

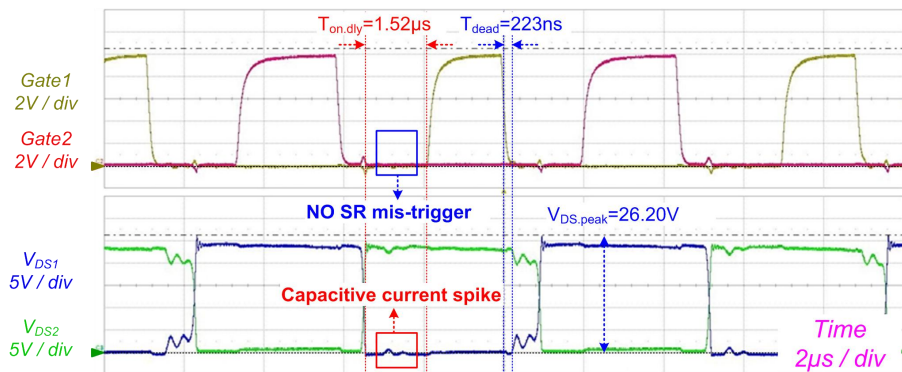
竞争对手M



▪ T_{on,dly} : 小, T_{soft-off} : 大

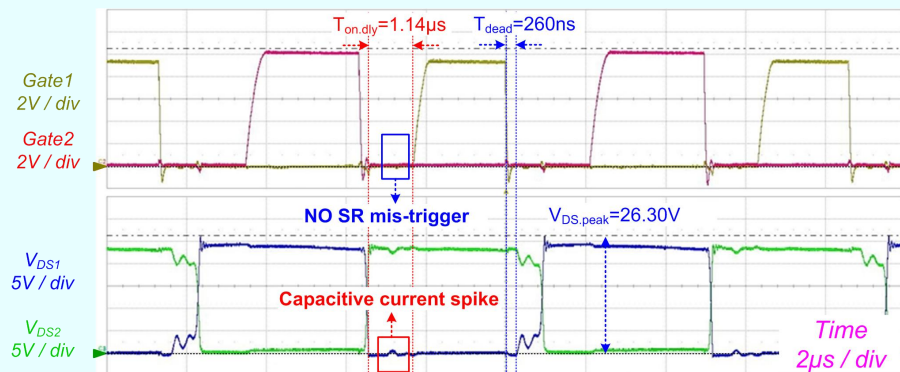
实验波形(10%负载)

FAN6248 EVT1



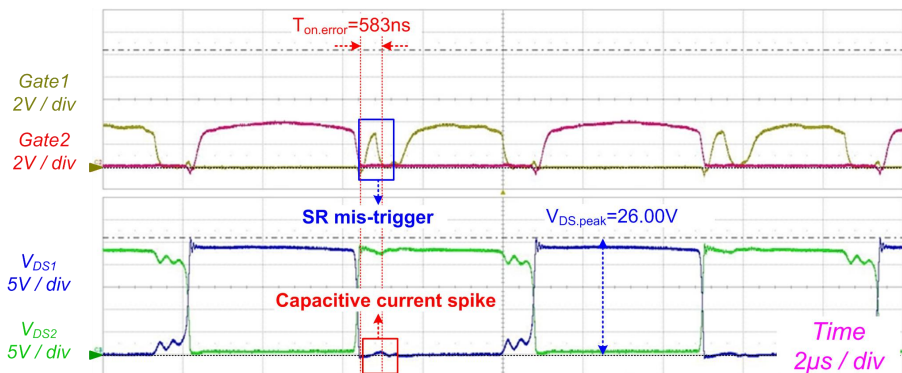
▪ T_{on} : 没有误触发, T_{dead} : 小

竞争对手S



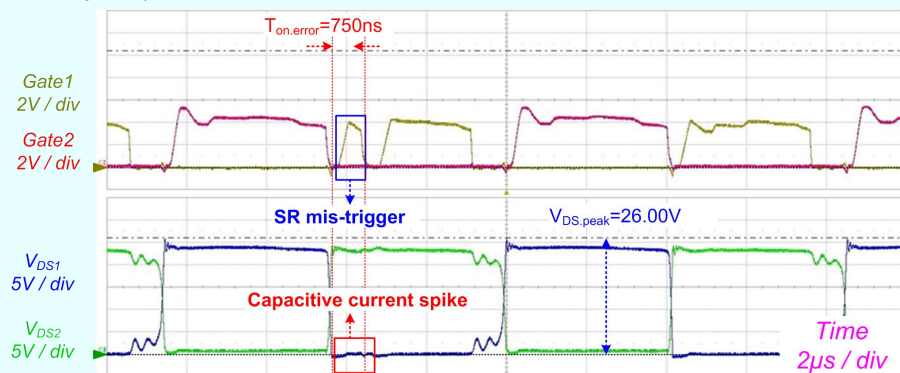
▪ T_{on} : 没有误触发, T_{dead} : 小

竞争对手N



▪ T_{on} : 误触发, $T_{soft-off}$: 大

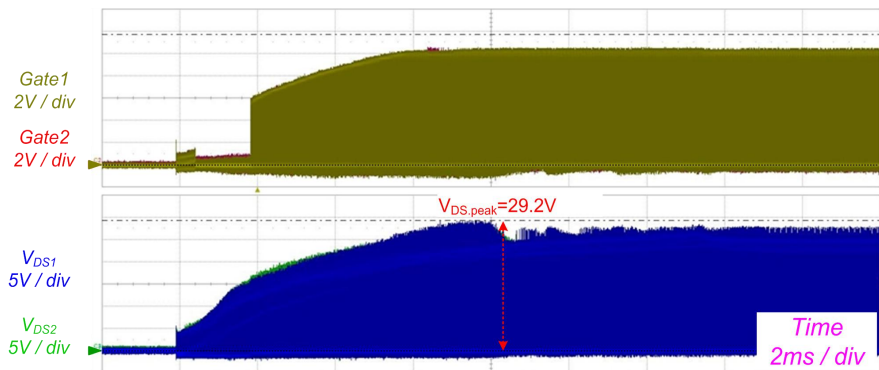
竞争对手M



▪ T_{on} : 误触发, $T_{soft-off}$: 大

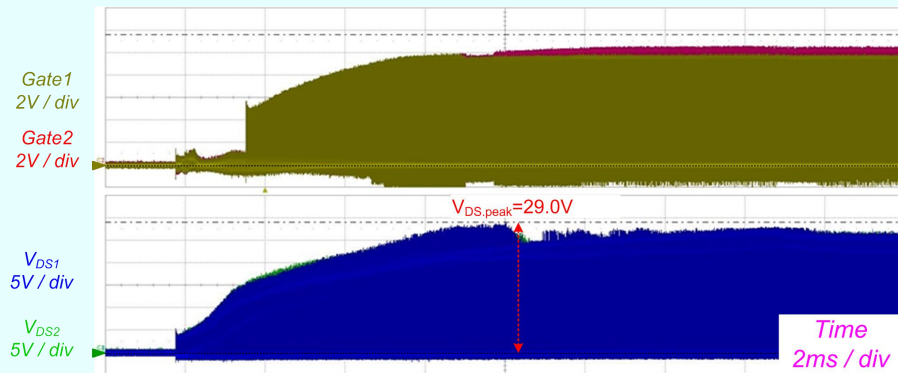
实验波形 ($V_{ds.SR}$ @ 启动)

FAN6248 EVT1



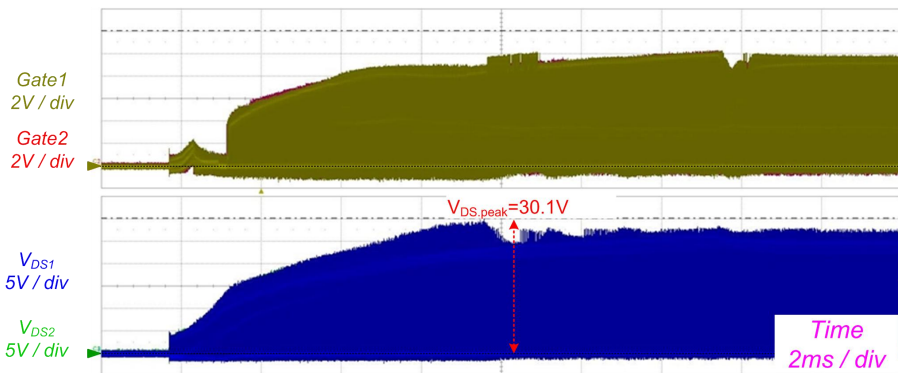
▪ $V_{DS,peak}=29.2V$

竞争对手S



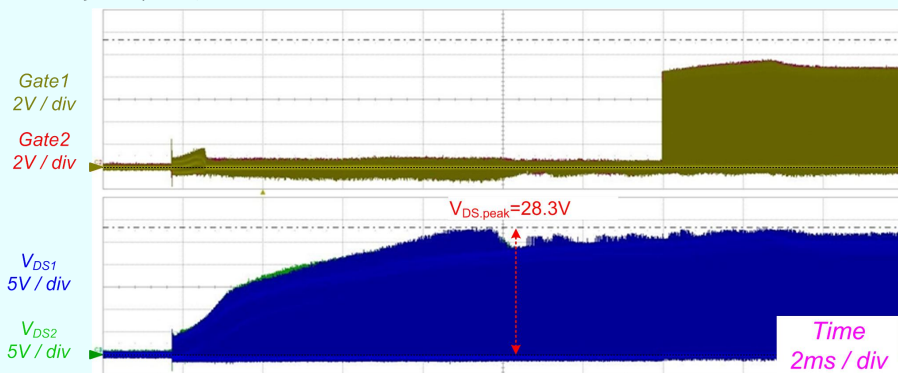
▪ $V_{DS,peak}=29.0V$

竞争对手N



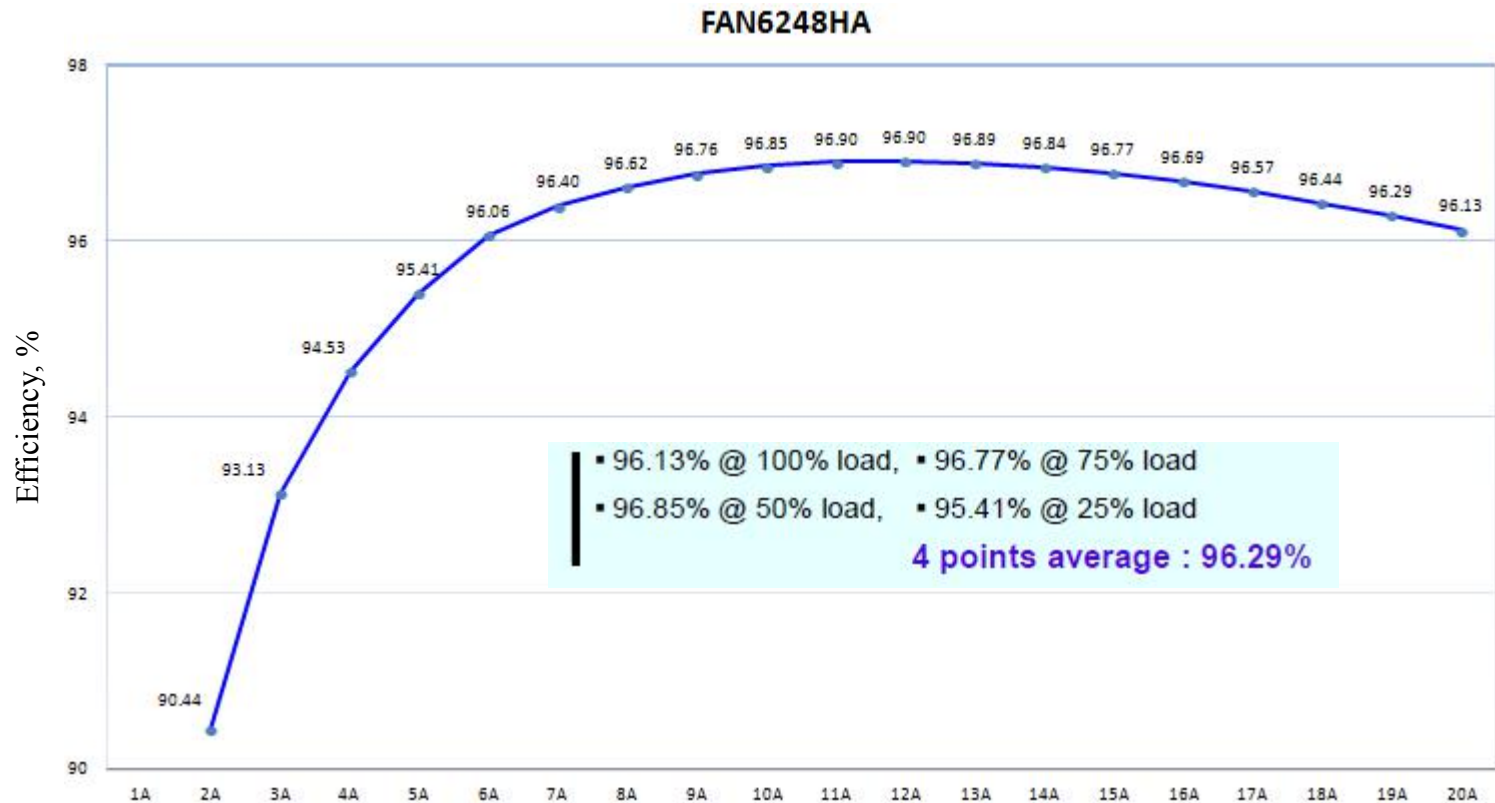
▪ $V_{DS,peak}=30.1V$

竞争对手M



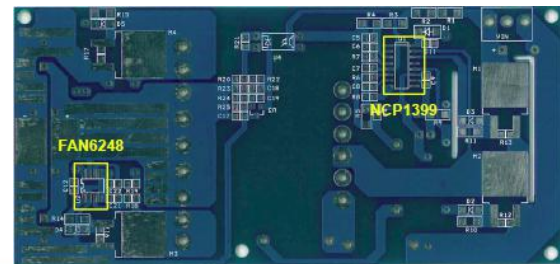
▪ $V_{DS,peak}=28.3V$

FAN6248提供最高能效



System Specification

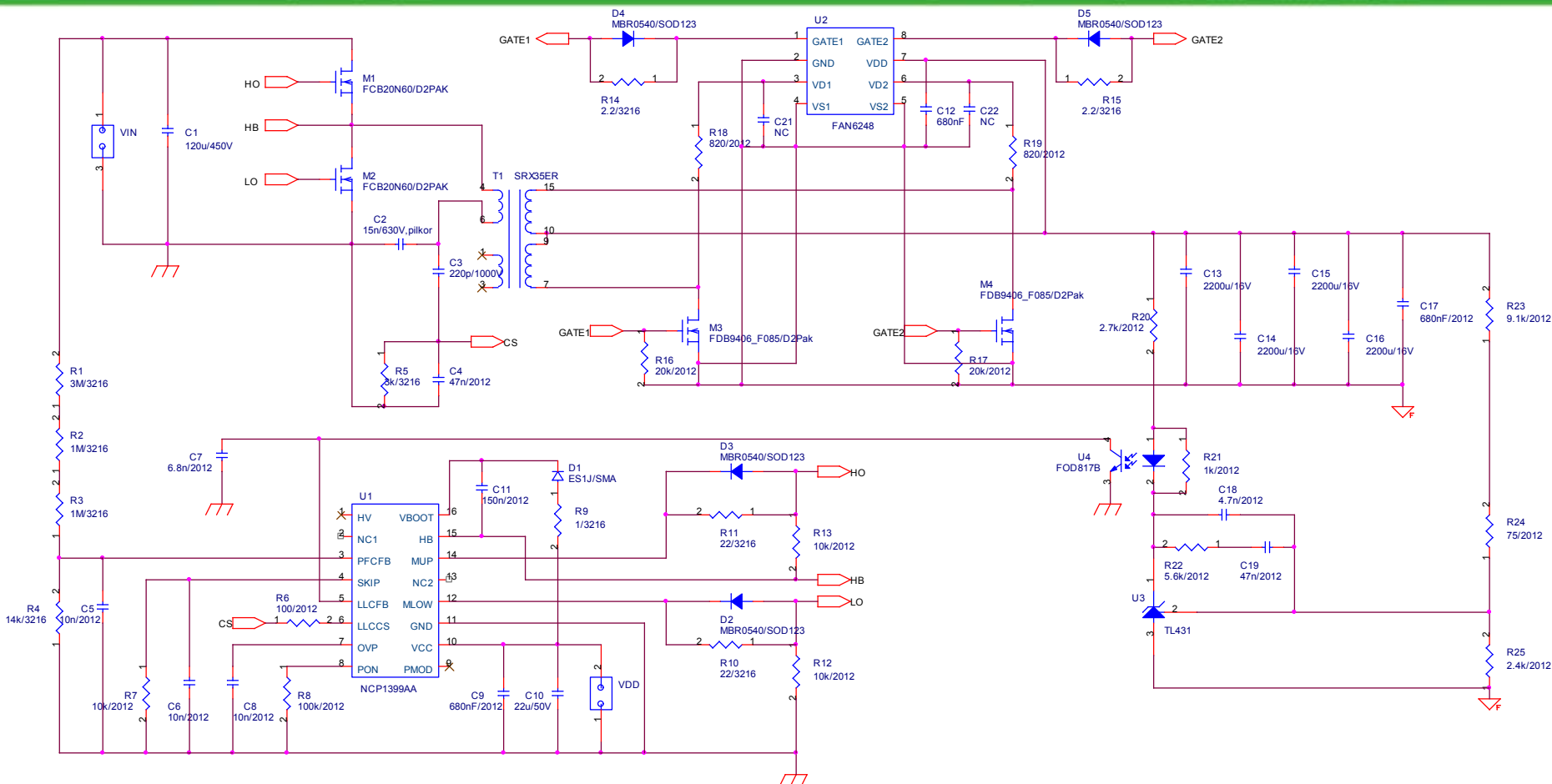
- $V_{in}=390V_{dc}$, $V_o=12V_{dc}$, 240W
- Primary controller : NCP1399AA, $f_s=110kHz$ at full load



4. 工具与资源

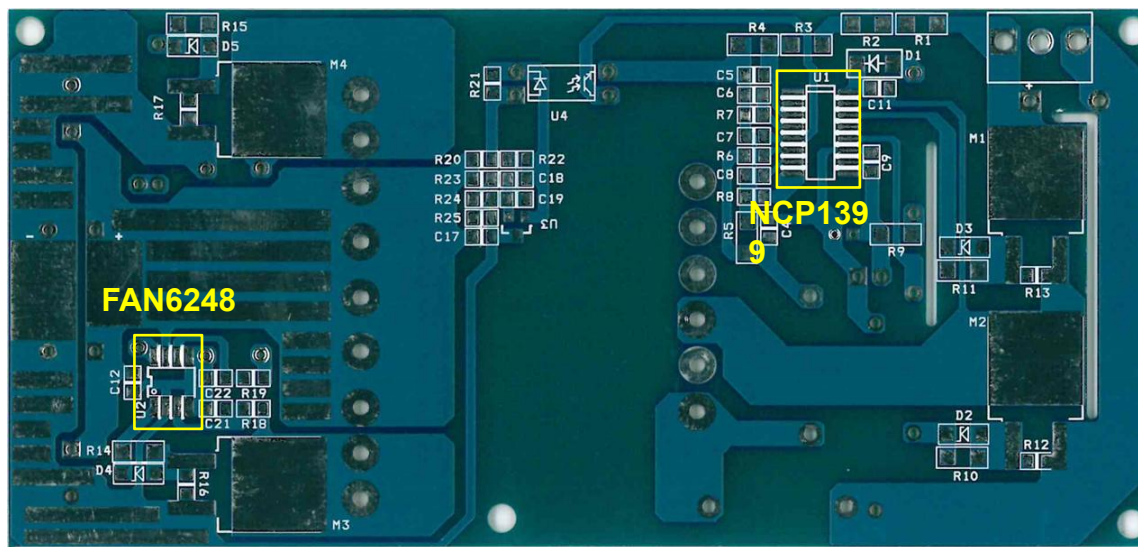
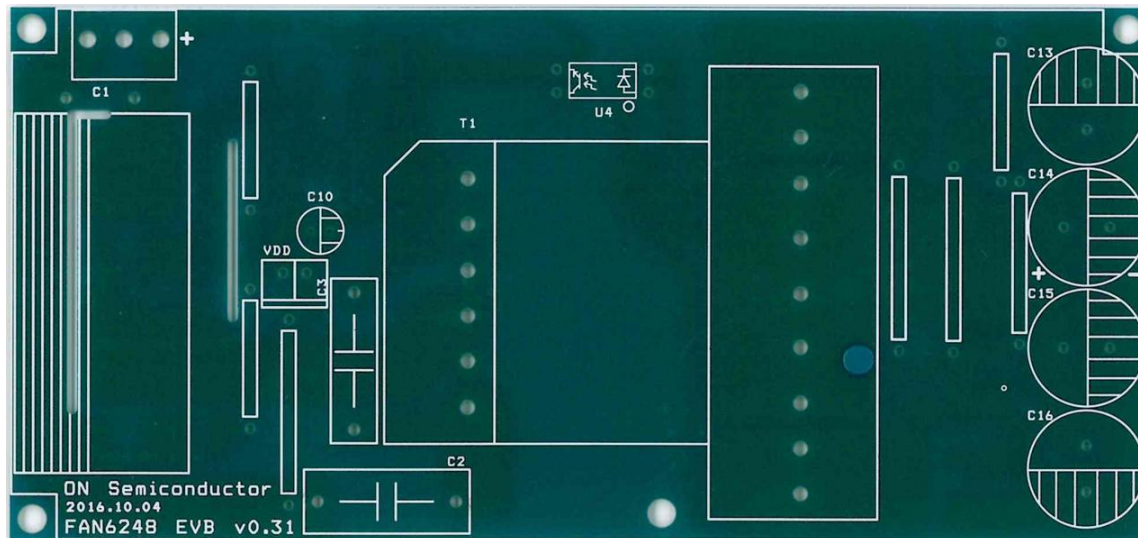
- 240 W demo板
- 小demo板

240 W demo, FAN6248HA



- 系统规格:
 $V_{in}=390V_{dc}$, $V_o=12V_{dc}$, $20A_o$, $240W$, $f_s=110kHz$ (满载时)
- LLC 控制器: NCP1399, SR 控制器: FAN6248HA

Demo板PCB布版



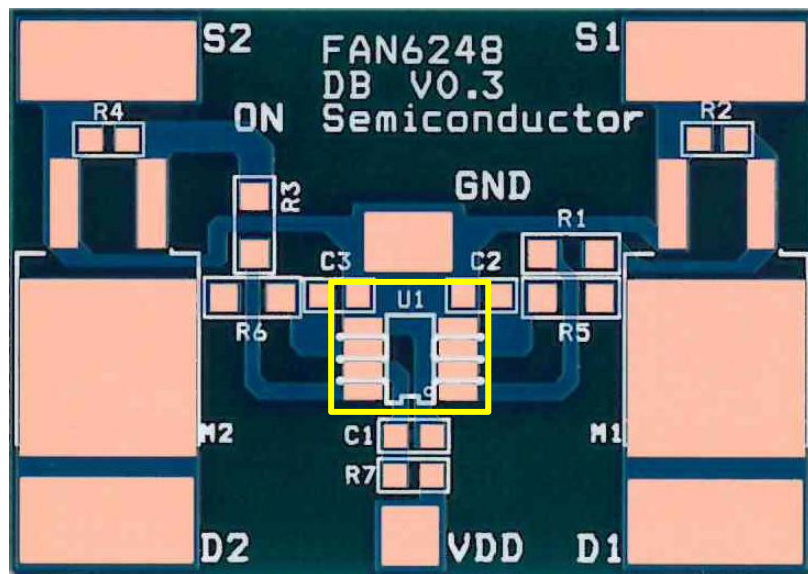
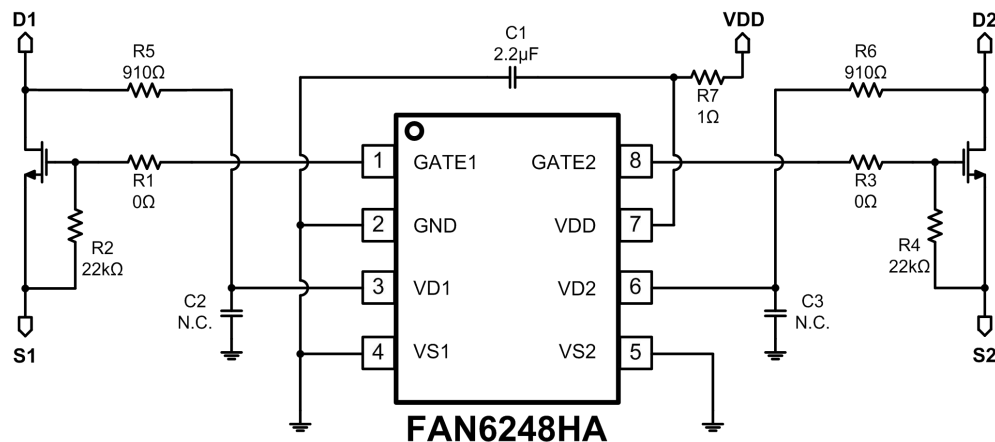
- 单层
- 铜箔：2oz
- 材料：FR4
- 厚度：1.6mm
- 尺寸：124mm X 58mm

Demo板变压器

	Pin (Start → Finish)	Wire	Turns	Winding Method	Barrier Tape		
					TOP	BOT	Ts
N _p	6 → 4	0.1φ×50 USTC	37	Solenoid winding	-	-	-
Insulation : Polyester Tape t = 0.025mm, 2Layers							
N _s	15→10 13→8	0.10φ×75 USTC	2	Bifilar	-	-	-
Insulation : Polyester Tape t = 0.025mm, 2Layers							
N _s	14→9 12→7	0.10φ×75 USTC	2	Bifilar	-	-	-
Insulation : Polyester Tape t = 0.025mm, 2Layers							
N _s	15→10 13→8	0.10φ×75 USTC	2	Bifilar	-	-	-
Insulation : Polyester Tape t = 0.025mm, 2Layers							
N _s	14→9 12→7	0.10φ×75 USTC	2	Bifilar	-	-	-
Insulation : Polyester Tape t = 0.025mm, 2Layers							

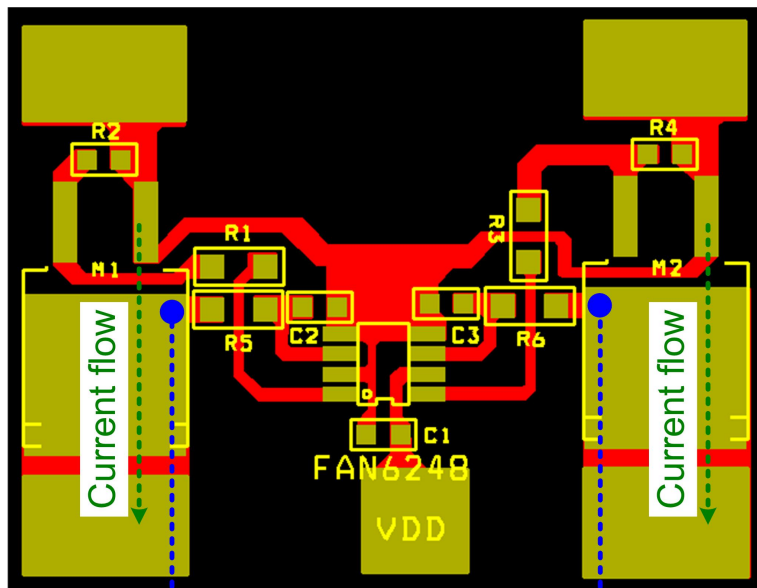
- 铜: SRX35ER (TDK)
- Ae=97 mm²
- Lp=600μH
- Lr=95μH
- 器件编码 : SRX35ER-600 TDK K 6Y0112

小Demo板PCB布版

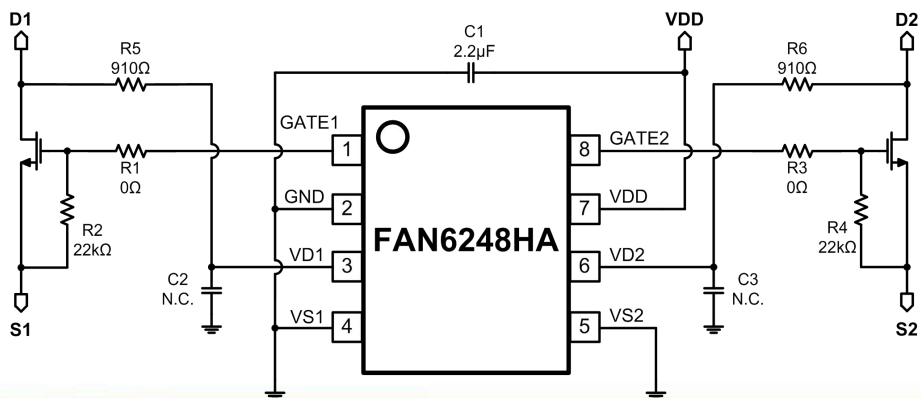


- 单层
- 铜箔: 2oz
- 材料: FR4
- 厚度: 1.6mm
- 尺寸: 46mm X 32mm
- R1, R3 : 0Ω
- R2, R4 : 22kΩ
- R5, R6 : 910Ω
- R7 : 1 Ω
- C2, C3 : N.C.
- C1 : 2.2μF
- M1, M2 : FDB9406_F085

建议的PCB布版



Quite place
Optimized drain sensing point



■ 建议的参数:

R1, R3 : 0Ω

R2, R4 : 22k Ω

R5, R6 :

-HA 版本: $820\Omega \sim 910\Omega$,

-LA, HB 版本: 680Ω,

-LB 版本: 470 Ω

C2, C3 : 开路

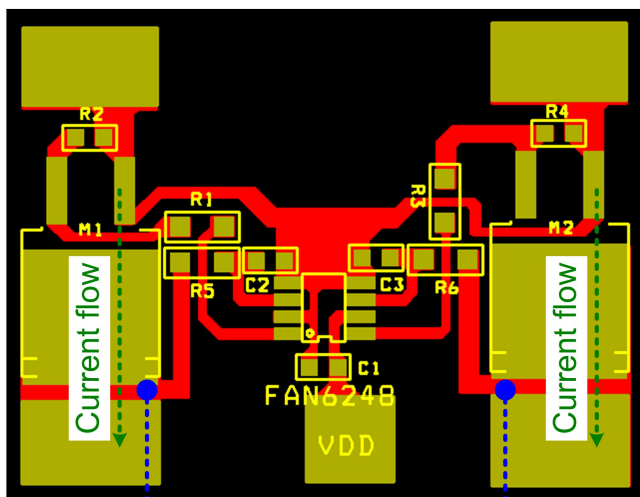
C1 : 2.2uF

M1, M2 : FDB9406 F085

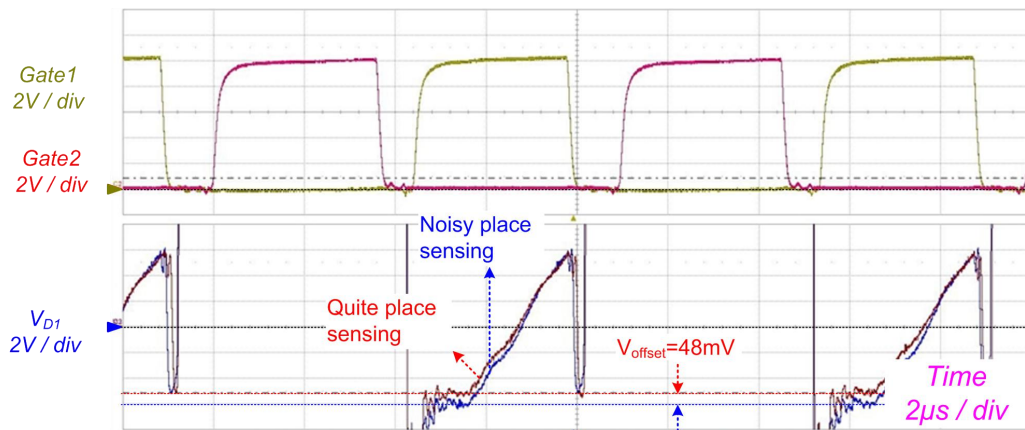
■ 漏极检测：

应在远离次级电流的无噪声处

不良的PCB布版



Noisy place
Not recommend



检测点:

- 次级电流中部
- 有噪声处
- 引起额外的偏置 V_{drain}
- 较窄的死区时间控制范围

5. 总结

总结

- 自调节死区时间SR控制
 - 可保持小的死区时间 (200ns)，不受SR MOSFET封装杂散电感的影响
 - 可采用极小 R_{dsON} 的SR MOSFET，较短的本体二极管导通
 - 比竞争对手产品更胜一筹的整体能效
- 反击穿控制→可靠的SR工作
- 自调节最小导通时间→更高抗噪性的导通特性
- SR电流反向检测→轻载时安全和稳定的操作
- 小封装 (SOIC 8引脚) →更少PCB空间和低成本
- 节能模式下低工作电流→ 待机模式低功耗
- 强大的门极驱动能力→ 达800 W的高功率系统设计

更多产品信息

有关FAN6248的更多信息，请访问网站：www.onsemi.cn

详细信息请联系您当地的安森美半导体销售代表或授权代理商。

www.onsemi.cn/PowerSolutions/locateSalesSupport.do

关注“安森美半导体”官方微信平台

扫描二维码
点击关注

