

随着全球对环境保护和可持续发展的重视，电动汽车（EV）/电动自行车/电动叉车等等电动交通工具喷涌而出，应运而生；EV CAR 作为一种清洁能源交通工具，得到了快速的发展和普及。而动力电池作为电动汽车的核心部件，其性能和管理对于电动汽车的整体性能、续航里程以及安全性具有重要影响。因此，研究和开发高性能、高安全性的动力电池管理系统成为电动汽车产业发展的重要课题。

BMS 能够实时监测电池的状态，包括电压、电流、温度等关键参数，从而确保电池在安全范围内运行。同时，BMS 还可以对电池进行充放电管理，避免过充、过放等情况的发生，而且还可以进行短路保护，从而延长电池的使用寿命和提高安全性。

通过 BMS 的智能管理，可以优化电池的充放电过程，提高能源的利用率。

✚ 工作原理介绍

锂电池存在安全性差，时有发生爆炸等缺陷。锂电池管理系统（BMS）能对锂电池组进行有效的监控、保护、能量均衡和故障警报，进而提高整个动力电池组的工作效率和使用寿命。它通过检测动力电池组中各单体电池的状态来确定整个电池系统的状态，并根据它们的状态对动力电池系统进行对应的控制调整和策略实施，从而实现对动力锂电池系统及各单体的充放电管理以保证动力电池系统安全稳定地运行。

✚ BMS 控制板原理图

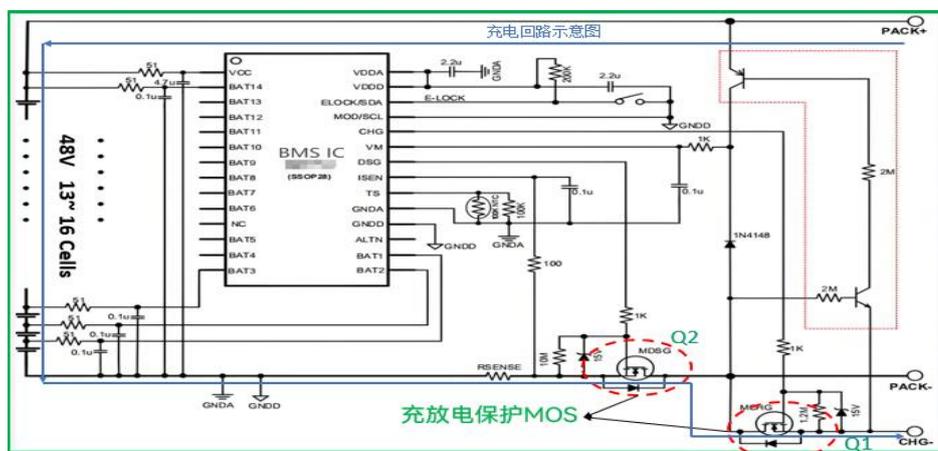


图 1 BMS 控制板原理图

✚ MOSFET 在 BMS 中的安全保护

- 过电流保护：预设电流超过保护阈值及延时时间，MOSFET 关断，防止外部短路损坏负载，有效地防止过大电流损坏电池；
- 过充电保护：充电电压高于上限时，MOSFET Q1 断开充电回路；
- 过放电保护：放电电压低于下限时，MOSFET Q2 断开放电回路；
- 过温保护：温度高于或低于正常范围时，MOSFET 关断，禁止充、放电。

✚ MOSFET 在 BMS 中的过流保护

在过流保护（短路保护可以认为是非常大的电流保护）过程中，由于整个环路的内阻比较小(100mR 左右)，所以短路电流会非常大，几百安培甚至几千安培。因此需要我们在极短的时间（100ms 以内甚至更短）内关闭放电 MOS 管，电流会经历从大瞬间变小，乃至为零的过程，这里就产生了极大的 di/dt ，对 MOSFET 的抗冲击能力就形成了严峻的**考验**。

● 考验 1: MOSFET 的雪崩能力(UIS)

如图 2 所示， 电池充放电回路等效电路。从图中可以分析到主要的三个寄生电感：

- 电芯内部电感 L3(类似于电解电容的卷绕形式)；
- PCB 大功率走线部分存在的寄生电感 L2；
- 外部链接负载的导线存在的寄生电感 L1。

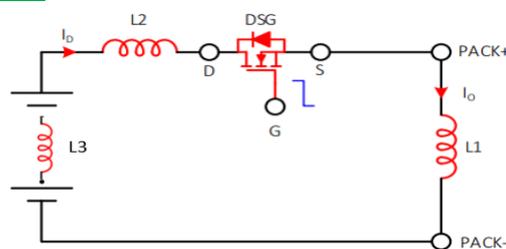


图 2 电池充放电回路等效电路

在 MOSFET 关断过程中，其 D、S 端的电压为： $V_{DS} = V_{bus} + (L1+L2+L3) * di/dt$ 。

如图 3 所示，MOSFET 的关断波形。

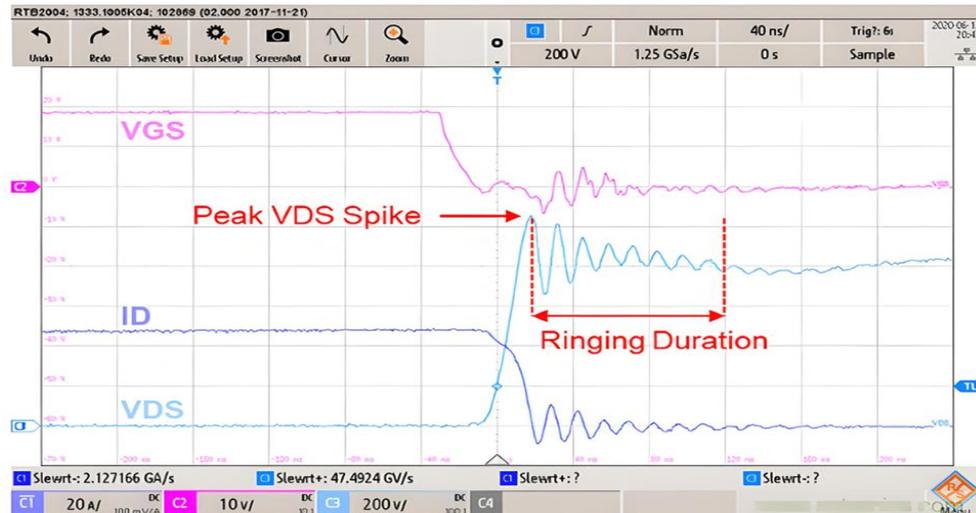


图 3 MOSFET 关断电压、电流波形

● 考验 2: MOSFET 的 SOA 能力

- 在电池刚充电瞬间，由于锂电池具有电容的负载特性，所以充电瞬间，MOSFET 有巨大的瞬态电流流过，对 MOSFET 的 SOA 有严格的要求；
- 在过流保护中，从检测到过流现象，到软件程序执行 MOS 关断，整个过程一般会持续数百 us，这个过程中，MOSFET 也要具备过大电流的能力，非常考验器件的 SOA，如图 3 所示。

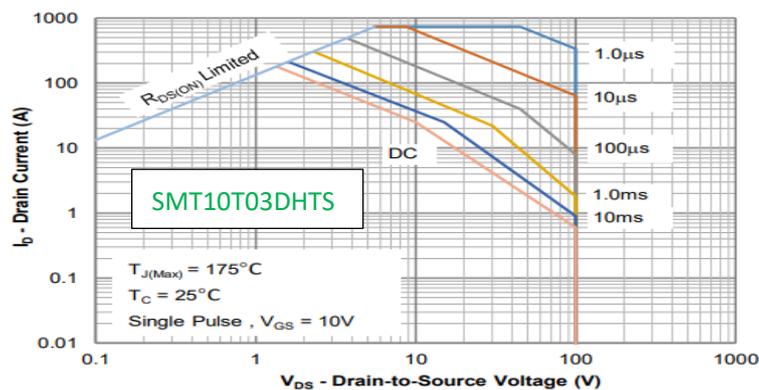


图 3 SOA

● 考验 3: MOSFET 的导通电阻 $R_{ds(on)}$

- 在电池充放电期间，MOSFET 处于一直导通状态，所以 MOSFET 小的导通电阻 $R_{ds(on)}$ ，可以减少 MOSFET 的导通损耗，降低 MOSFET 的温升，从而提升系统效率，如图 4 所示。

Electrical Characteristics (@ $T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.)

Parameter	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Off Characteristics ⁽⁶⁾							
Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{(BR)DSS}$	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$	100	-	-	V	
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 100V, V_{GS} = 0V$		-	1.0	μA	
			$T_J = 125^\circ\text{C}$	-	100	μA	
Gate-Source Leakage Current	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20V, V_{DS} = 0V$	-	-	± 100	nA	
On Characteristics ⁽⁶⁾							
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{GS} = V_{DS}, I_D = 250\mu A$	2.0	3.0	4.0	V	
Static Drain-Source On-Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 20A$	TO263-3L	-	2.9	3.5	m Ω
			TO220-3L	-	3.1	3.6	m Ω

 图 4 MOSFET 导通电阻 $R_{ds(on)}$

考验 4: MOSFET 封装的散热能力

- MOSFET 在对 BMS 进行短路保护时,关断过程和短路过程将产生巨大的功率损耗,这对 MOSFET 的散热能力有极高的要求,否则 MOSFET 容易被热击穿, MOSFET R_{th} 如图 5 所示。

Thermal Characteristics

Parameter	Symbol	Typ.	Max.	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient ⁽⁴⁾	R_{thJA}	30	35	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case ⁽⁵⁾	R_{thJC}	0.45	0.59	$^\circ\text{C/W}$

 图 5 MOSFET 热阻 R_{th}

✚ 技术参数对比: SMT10T03D(A)HT Vs. 友商 A

我们在实验过程中,拿友商 A 做比较,其重要技术参数对比如图 6 所示。

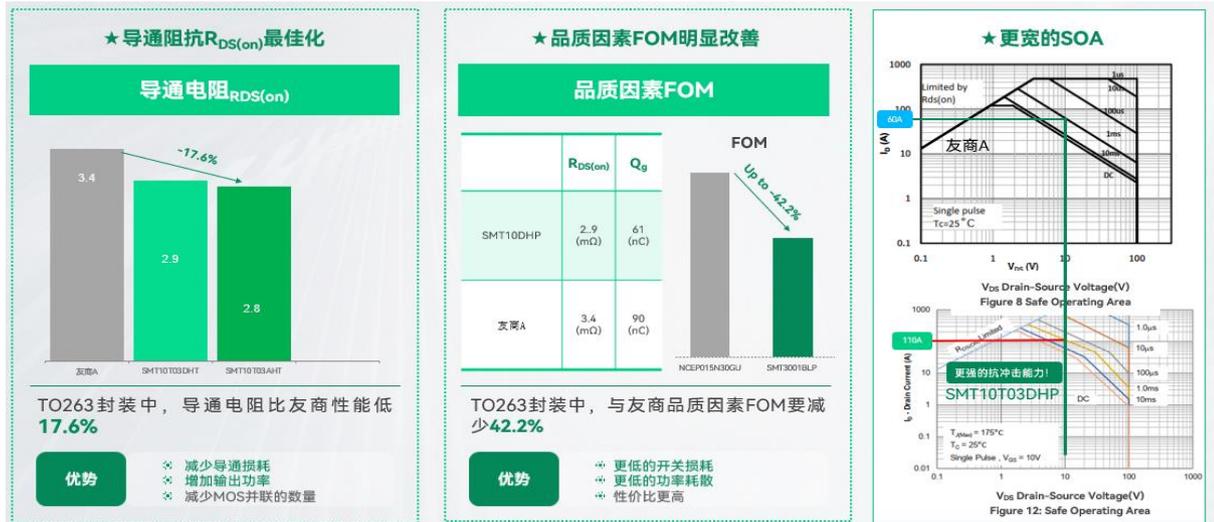


图 6 MOSFET 重要参数对比

✚ BMS 线性能力对比 (SOA)

- 测试条件如下：

$V_{DS}=48V$, $V_{GS}=5V$;

测试电路板如下图 7 所示。

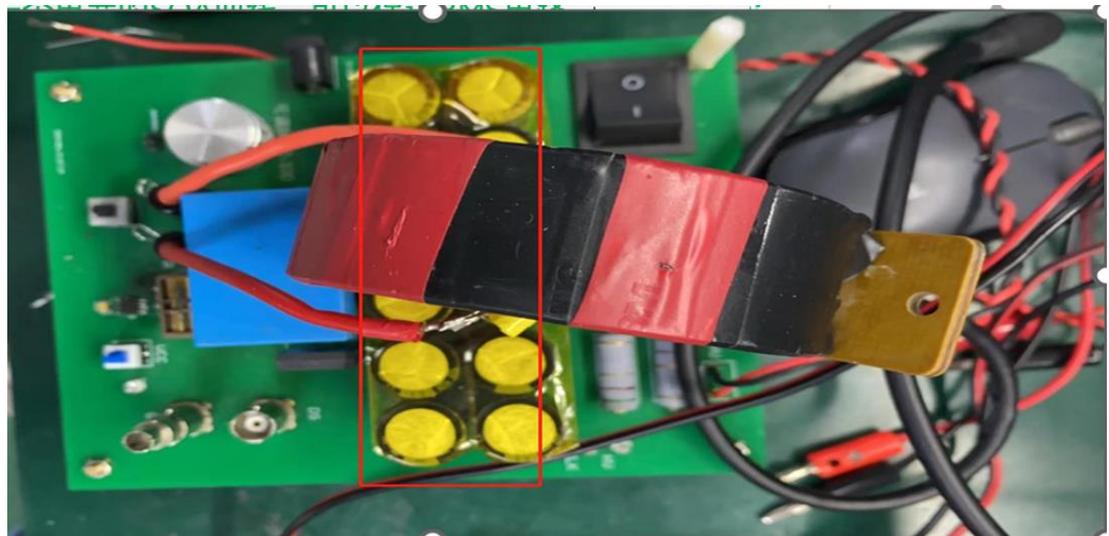


图 7 BMS 短路能力测试 Demo 板

- 测试 V_{DS} 电压/ I_D 电流波形如下：

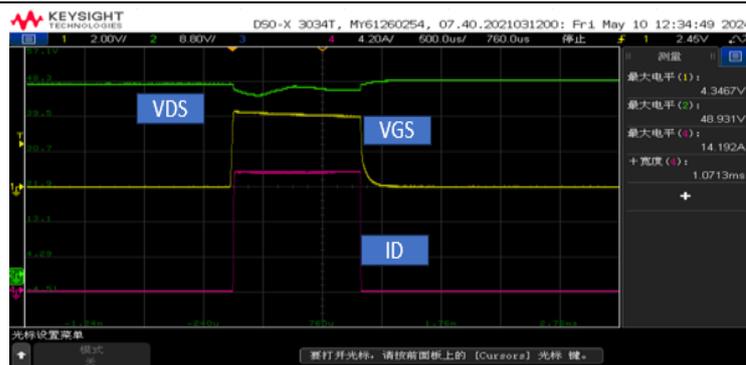


图 8 SMT10T03DHT, 10ms

● 测试结果对比:

如图 9 所示, 从测试结果来看,

- ✓ 无论 1ms, 10ms, 100ms, SiNESEMI 的 SMT10T03DHT 电流能力都远远优于友商 A;
- ✓ 实际工作过程中, 一个更宽的 SOA 曲线, 可以保证 BMS 电路在刚启动瞬间和电路保护过程中, 系统运行更加稳定和可靠。

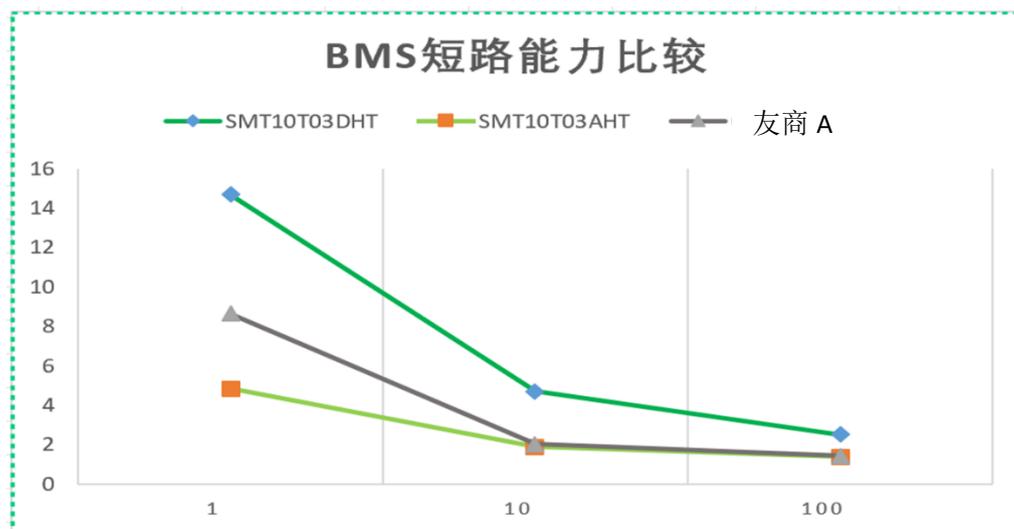


图 9 BMS 短路能力比较

✚ BMS 短路耐量能力对比 (UIS)

BMS 短路现象发生时, 瞬间大电流流过 MOSFET, 同时关断过程中的 di/dt 将对 MOSFET 产生非常大的冲击。

● 测试条件如下:

短路阻抗限制 $56m\Omega$, $R_g=116.4\Omega$, 脉冲宽度 15us;

VDD=72V, VGS=10V。

● 关键参数比较

	SMT10T03D(A)HT	友商A	Δ
FOM	176.9	306	-42.2%
Crss	19	33	-42.4%
RthJC	0.45	0.55	-18.2%

● 测试电压和电流波形

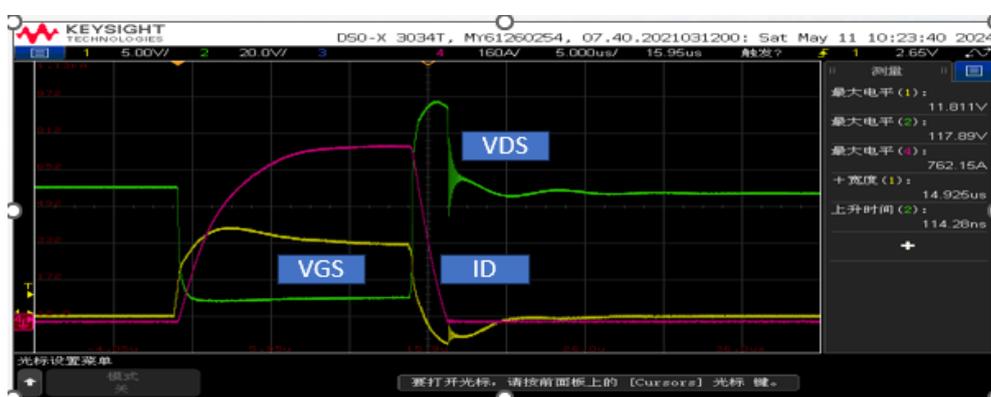


图 10 SMT10T03AHT, ID=762A

● BMS 短路耐量能力测试结果

- ✓ 单一地测试雪崩能力，SMT10T03DHT 的电源电压 VDD 加到 71V，雪崩电流 IAS 为 710A，72V-MOSFET 损坏；SMT10T03AHT 的电源电压 VDD 加到 72V，雪崩电流 IAS 为 762A，73V-MOSFET 损坏。仅 VDD 电压大小并不能真正反映器件的实际雪崩能力，因为同样的 VDD，由于 SMT10T03DHT 的 Q_g 更小，所以 di/dt 更大，VDS 也更大。
- ✓ 由于 SiNESEMI 的品质因素 FOM， Q_g 及热阻值 RthJC 均比较好，实际应用中，可以通过增加驱动电阻 R_g ，降低 di/dt ，从而减少甚至避免雪崩对器件的损伤。

✚ BMS 中 MOSFET 应用电路设计建议

当短路达到了 MOS 的雪崩（雪崩）电压时，短路成功是有次数的，每次雪崩都会对 MOS 有一定的损坏，所以电路设计的时候，要尽量减少 MOSFET 雪崩现象的出现。

● 应用电路设计建议

- ◇ 通过更改不同位置 MOS 的驱动电阻来调节导通时间，达到电流均流，最终实现热平衡；
- ◇ 尽量减少寄生电感，它直接影响到 MOSFET 关断时的瞬态电压大小；
 - ✓ 尽可能的缩短过流回路路径
 - ✓ PCB 覆铜时，能用 10Z 就别用 20Z，铜厚也影响 PCB 电感量
- ◇ 在兼顾 MOSFET 发热量的同时，适当增大 R_g ，以降低 di/dt
- ◇ 用 TVS 并联在 MOSFET 两端，TVS 的击穿电压尽可能靠近 MOSFET 的雪崩电压。

✚ MOSFET 雪崩实测 di/dt 下降波形

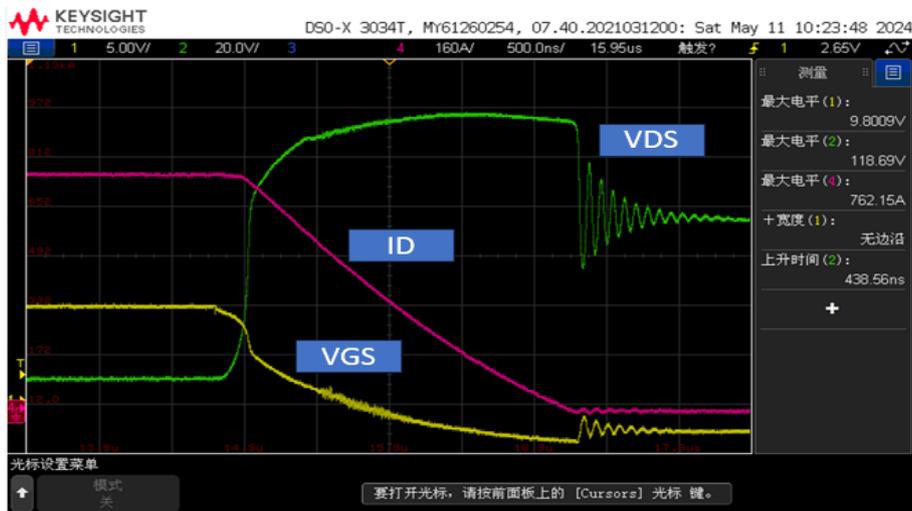


图 11 SMT10T03DHT, $I_D=762A$

从图中可以测量出，电流从最大值下降到 0，仅仅为 2.5us，所以 di/dt 较大!! 因为 Q_g 比友商 A 小 32.2%，所以才导致 MOSFET 的雪崩能力大幅下降。实际应用中，可以通过适当增大 R_g ，将 di/dt 下降的时间延长，进而提升其雪崩能力，甚至避免雪崩的出现。

✚ VDS 波形振铃的改善

在测试过程中，我们发现 MOSFET 雪崩之后，G、S 端的电压波形出现振铃；D、S 端的波形也出现振铃。经过量测，Vgs 振铃的大小 ΔV_{gs} 超过 MOSFET 开启电压 V_{th} ，导致 MOSFET 开启，所以可以看到 Vds 电压不断振荡，这直接影响着设计的可靠性。当振铃的幅值较小时，可能问题不大；但是当其幅值较大时，会增加 MOSFET 的开关损耗，甚至使得系统不断重启，影响产品的稳定可靠性。

● 振铃产生根源

- ◆ 如图 12 所示，RLC 组成串联谐振电路，当 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时，系统处于欠阻尼情况，在这种情况下，电路发生振荡；

消除振铃的方法：

- ✓ 增大驱动电阻 R，使其工作在临界阻尼；
Rg 上限值：为防止 MOS 管关断时产生很大的 dV/dt 使得 MOS 管再次误开通。一般要求 $R_g \leq V_{th} / (C_{gd} \cdot dv/dt)$ ， dV/dt 可以根据电路实际工作时 MOS 的 D、S 间电压和 MOS 管关断时 D、S 电压上升时间求得。
- ✓ MOSFET 栅极的驱动 PCB 走线尽可能的短；
- ✓ 在 GS 端并联一个 nF 级的瓷片电容。

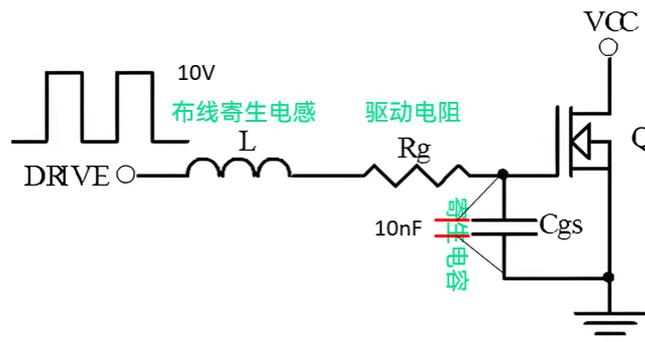


图 12 振铃产生回路

● 改善后实测波形

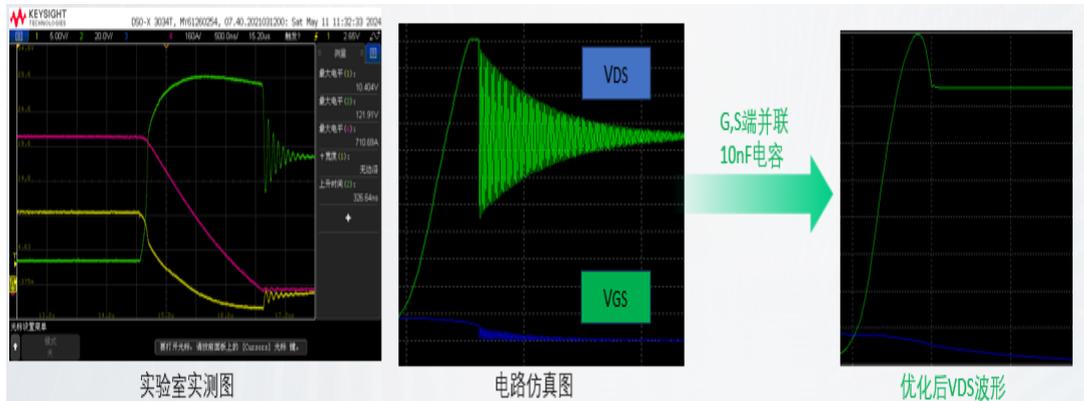


图 13 改善后的波形

 **SMT10T03D(A)HT 技术参数**

P/N	VDS_Max (V)	ID_Max (A)	VGS(th)_Typ (V)	RDS(ON)_Max @ VGS = 10V (mΩ)	VGS_Max (V)	EAS_Max (mJ)	Ciss_Typ (pF)	Crss_Typ (pF)	Qg_Typ (nC)	Package
SMT10T03DHT	100	184	3	3.5	±20	1000	4628	19	61	TO263-3L
SMT10T03AHT	100	186	3	3.6	±20	960	4406	20	63	TO263-3L

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—应用技术部