AN3746

利用 AgileSwitch® Augmented Switching™ 栅极驱动器对 62 mm SiC 功率模块进行表征

摘要

开关 SiC MOSFET 功率模块会产生两个严重问题：关断电压过冲和振铃。为了优化器件性能，必须要解决这两个问题。我们需要在保持开关效率的同时控制这两个寄生问题。Microchip 的 AgileSwitch® 系列栅极驱动器已获得专利，该系列产品通过在关断期间将栅极电压值和停留时间调整为一个或多个中间值来控制关断 di/dt，从而解决了这些问题。这个过程通常称为 Augmented Turn-Off™ 或 ATOff。

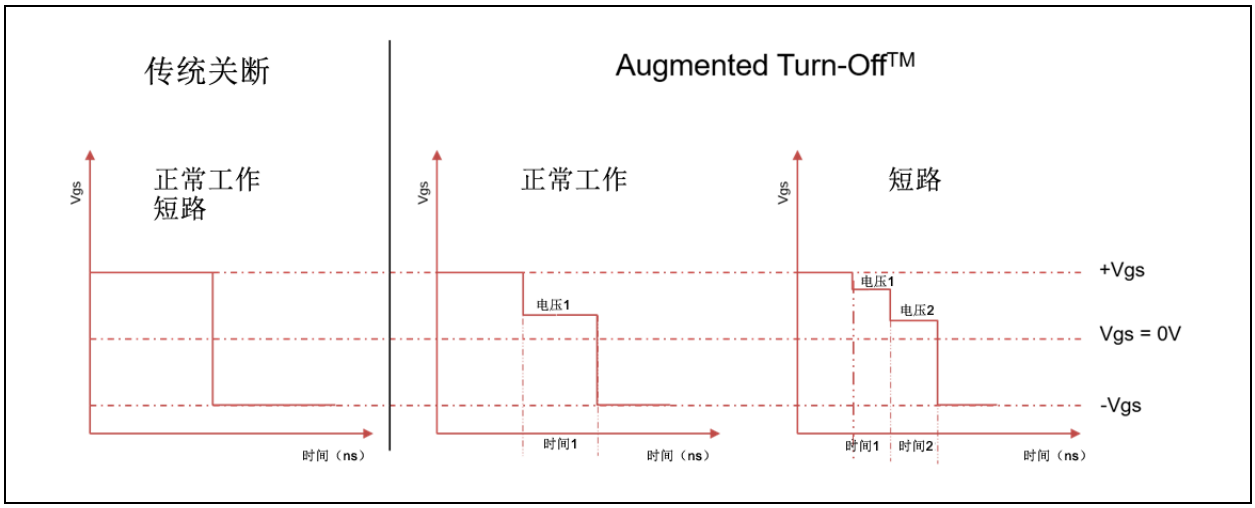

图 1： *传统关断与 Augmented Turn-Off™*

Augmented Turn-Off 的优势如下：

1. 减少开关损耗
2. 对导通 dv/dt 进行精细控制
3. 降低关断过冲电压
4. 稳健的短路保护和响应性能

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

简介

本报告概述了 62 mm SiC 半桥模块的表征过程。我们将 AgileSwitch 2ASC-12A1HP 栅极驱动器内核连接至 AgileSwitch 62CA1 模块适配器板，然后进行测试。

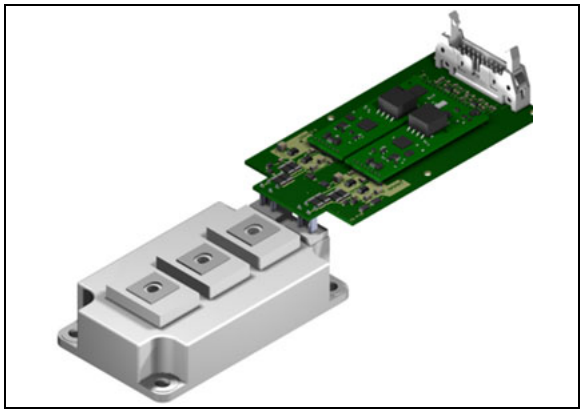

图 2： *将已连接 62CA1 适配板的 2ASC-12A1HP SiC 驱动器内核插入 62mm 模块*

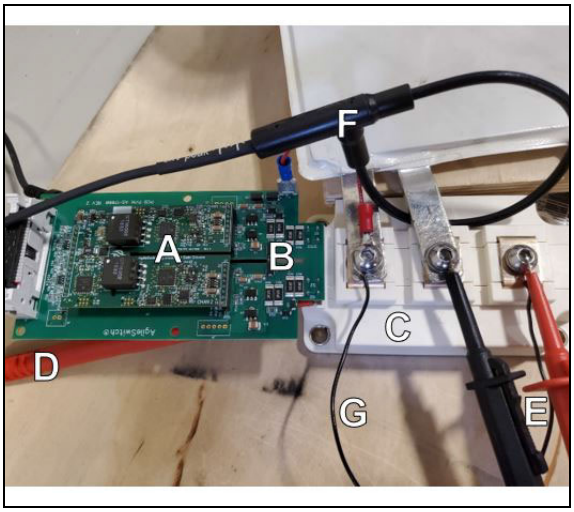

图 3： *双脉冲设置图示：（A）2ASC-12A1HP、（B）62CA1 适配板、（C）FF6MR12KM1 模块、（D）V_{DS} 探针和 I V_{GS} 探针、（F）电流探针和（G）电感*

双脉冲测试

硬件设置

将电感跨接在上桥臂MOSFET的两端进行双脉冲测试，如图 4 所示。在测试期间，上桥臂 MOSFET 保持在 -5V，而下桥臂 MOSFET 使用**摘要**中描述的配置进行开关操作。将罗氏线圈放在模块引脚 2 上的源极回流总线周围，以测量电流。

测试条件为 600V、250A，以重现模块数据手册中列出的工作条件。使用较小的栅极电阻，因为 2ASC-12A1HP 可通过数字方式控制开关边沿，所以如果使用较大的电阻就会导致额外损耗，性能方面也没有什么优势。

表 1：　双脉冲硬件设置

参数	符号	值	单位
直流链路电压	V_{DC}	600	V
脉冲电流	I_D	250	A
感性负载	L_{LOAD}	21.6	µH
导通栅极电阻	$R_{G(ON)}$	1.1	Ω
关断栅极电阻	$R_{G(OFF)}$	1.1	Ω
环境温度	T_{AMB}	30	°C

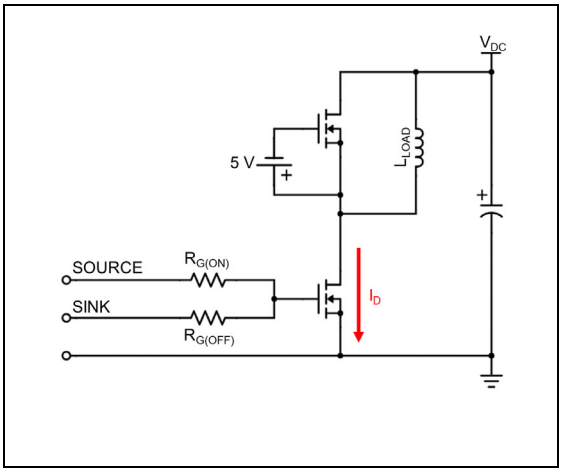

图 4： *双脉冲示意图*

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

软件设置

双脉冲配置

根据所选负载电感、直流链路电压和所需最大漏极电流来设置双脉冲配置的时序。在 V_{DC} = 600V 以及 L_{LOAD} = 21.6 µH 的条件下，需要 9 µs 脉冲才能达到 250A。双脉冲波形的完整时序如图 5 所示。第一个脉冲的导通时间定义为时间 0。在 t_{OFF1} 时进行关断测量，在 t_{ON2} 时进行导通测量。第一个脉冲的宽度（t_{OFF1} - t_{ON1}）设置为能够达到所需的电流；第二个脉冲的宽度（t_{OFF2} - t_{ON2}）基本上无关紧要，只要其宽度足以使系统在导通后趋于稳定，以便获取正常的测量结果。

表 2：　双脉冲开关参数

参数	符号	值	单位
脉冲 1 导通时间	t_{ON1}	0	µs
脉冲 1 关断时间	t_{OFF1}	9	µs
脉冲 2 导通时间	t_{ON2}	28	µs
脉冲 2 关断时间	t_{OFF2}	31	µs
完全导通栅极电压	$V_{GS(ON)}$	15	V
完全关断栅极电压	$V_{GS(OFF)}$	-5	V

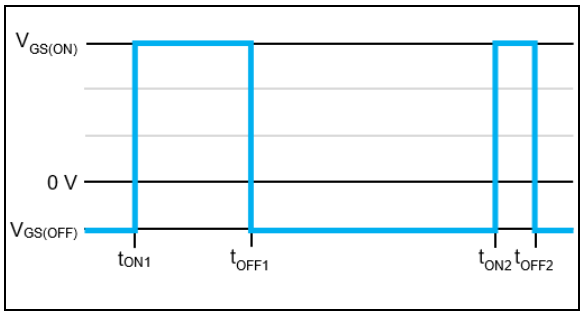

图 5：　双脉冲开关曲线图

Augmented Switching 配置

为清晰起见，图 5 中的开关曲线以简化的方式显示了在 VGS(ON) 和 VGS(OFF) 之间直接切换时的导通和关断边沿。AgileSwitch 栅极驱动器使用 Augmented Switching 功能，通过精确的时序和电压步长以数字方式控制这些边沿。针对这些测试，我们将驱动器编程为无任何中间导通步骤（即导通波形直接从$V_{GS(OFF)}$切换至$V_{GS(ON)}$）以及只有一个中间关断步骤，如图 6 中所示；该设置称为两级关断（Two-Level Turn-Off，TLTO）。我们还测试了多个 V_{TLTO} 和 t_{TLTO} 设置，以观察模块在各种开关配置中的性能。

表 3：　Augmented Switching™ 参数

	符号	值	单位
完全导通栅极电压	$V_{GS(ON)}$	15	V
完全关断栅极电压	$V_{GS(OFF)}$	-5	V
两级关断电压	V_{TLTO}	变化	V
两级关断时间	t_{TLTO}	变化	ns

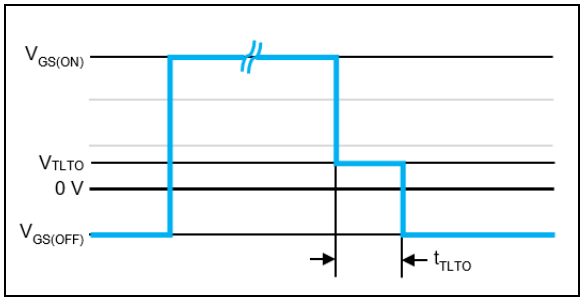

图 6：　Augmented Switching™ 曲线图

结果

导通

图 7 显示了示波器中的导通结果。电流峰值达到 323A，然后稳定在其设定点 250A。

表 4 汇总了此测试的参数值；导通能量损耗为 1.67 mJ，比数据手册规范低 68%。

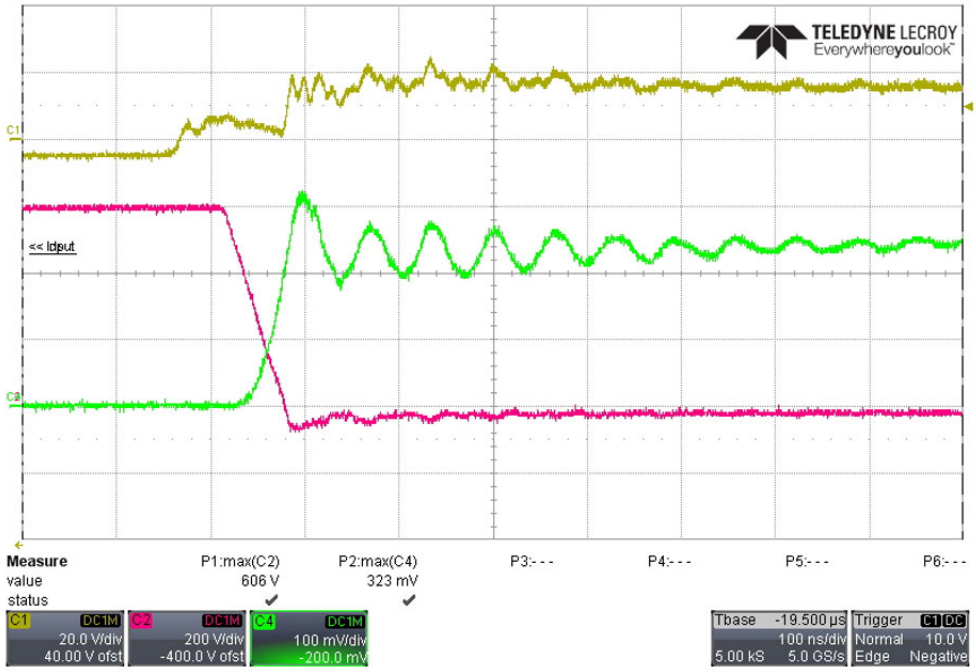

图 7： *导通波形：V_{GS}（通道 1）、V_{DS}（通道 2）和 I_D（通道 4，1 A/mV）*

表 4：　双脉冲测试结果（导通）

参数	符号	值	单位
开关损耗	E_{ON}	1.67	mJ
电压斜率	dV/dt	9.06	kV/µs

注 1： 用于这些测试的电流探针会有一个延迟，为计算出准确的损耗值，我们必须考虑这个延迟；本文档中的示波器图像并未反映用于后处理的延迟时差校正程序。

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

关断

图 8 和图 9 显示了两种不同设置的关断结果：一种设置针对低开关损耗进行了优化，另一种设置则针对低过冲电压进行了优化。通常，中间步骤时间越长，器件关断速度就越慢，从而导致更高损耗，但可实现更低过冲，如表 6 所示。

关断期间实现的最低开关损耗为 1.37 mJ（过冲为 513V），最低过冲为 228V （损耗为 4.94 mJ）。

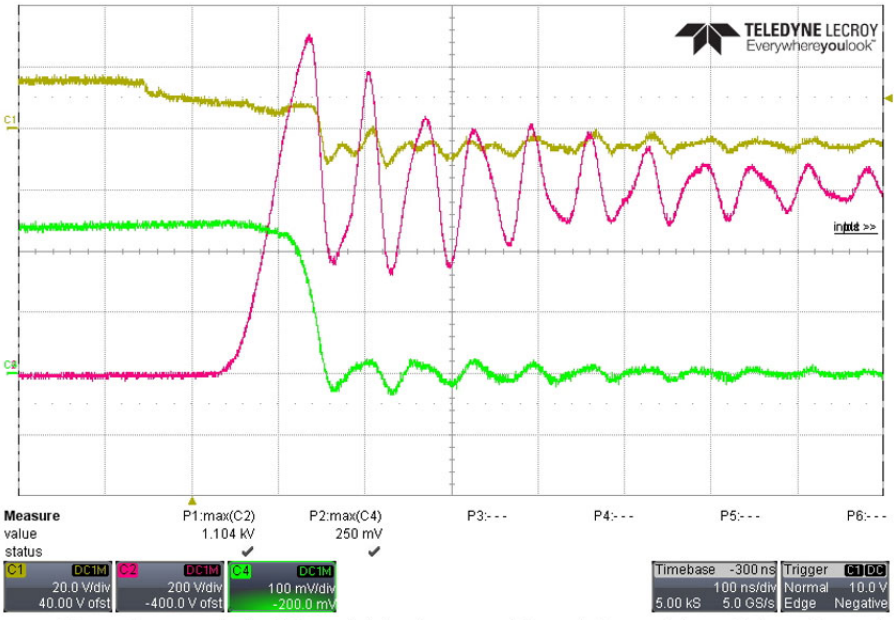

图 8： *针对开关损耗进行优化的关断波形：V_{GS}（通道 1）、V_{DS}（通道 2）和 I_D（通道 4，1 A/mV）*

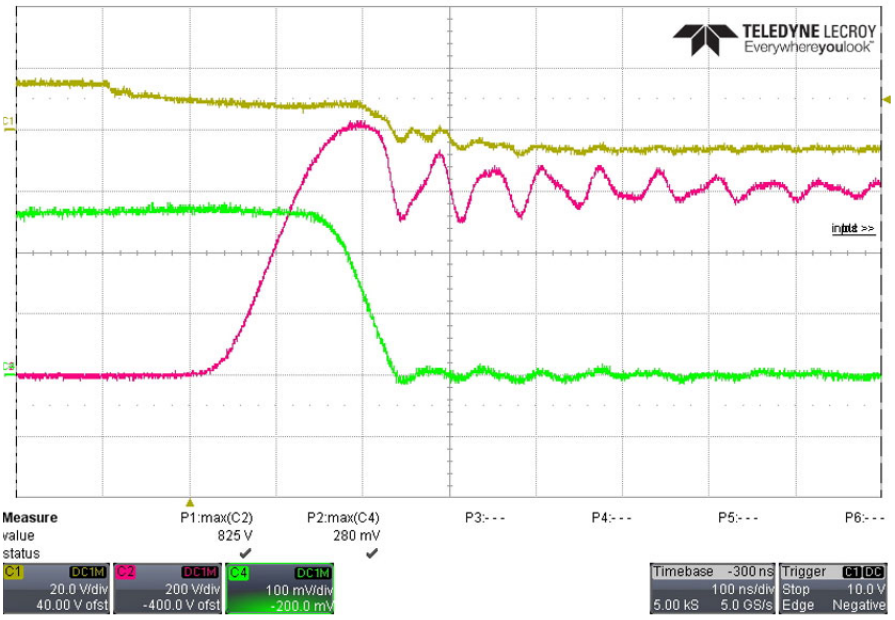

图 9： *针对过冲进行优化的关断波形：V_{GS}（通道 1）、V_{DS}（通道 2）和 I_D（通道 4，1 A/mV）*

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

表 5：　　双脉冲测试结果 （关断）

V_{TLTO} （V）	t_{TLTO} （ns）	开关损耗 （mJ）	与数据手册比较	V_{DS} 过冲 （V）
3	150	1.37	-73%	513
3	200	1.80	-65%	434
3	250	1.94	-62%	387
3	300	2.05	-60%	390
6	150	1.56	-69%	581
6	200	2.67	-48%	526
6	250	4.57	-10%	388
6	300	4.94	-3.1%	228

短路测试

硬件设置

短路测试的设置与双脉冲测试类似，只是将电感换为小电阻 （330 mΩ） 。此外，为了与模块数据手册中的参数相匹配，我们将直流链路电压增加至 800V。

表 6：　　短路硬件设置

参数	符号	值	单位
直流链路电压	V_{DC}	800	V
响应时间	t_{SC}	1.5	µs
阻性负载	R_{LOAD}	330	µΩ
导通栅极电阻	$R_{G(ON)}$	1.1	Ω
关断栅极电阻	$R_{G(OFF)}$	1.1	Ω
环境温度	T_{AMB}	30	°C

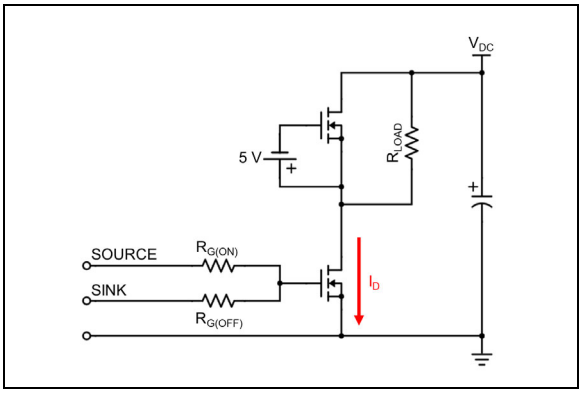

图 10：　　短路硬件设置

软件设置

除了正常工作期间的两级关断 （TLTO）外， 2ASC-12A1HP 还具有检测到去饱和 / 短路事件后执行多级关断 （Multilevel Turn-Off， MLTO）的功能。此功能与 TLTO 类似，但有一个额外的中间步骤。电压值和这些步骤的时序可在软件中配置，所以我们测试了一些设置组合，目的是确认哪种设置既可以提供足够的关断速度，又能最大限度地降低过冲电压。最终设置请参见表 7。此外还可以配置去饱和跳脱值，可将其转换为特定的检测时间。目前的设置是 1.5 µs，可在确保零误报的同时实现快速检测。

注 2：关断能量损耗规定为 5.10 mJ（典型值）。

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

表 7：　　多级关断参数

参数	符号	值	单位
完全导通栅极电压	$V_{GS(ON)}$	15	V
完全关断栅极电压	$V_{GS(OFF)}$	-5	V
多级关断电压 1	V_{MLTO1}	9	V
多级关断时间 1	t_{MLTO1}	500	ns
多级关断电压 2	V_{MLTO1}	4	V
多级关断时间 2	t_{MLTO1}	400	ns

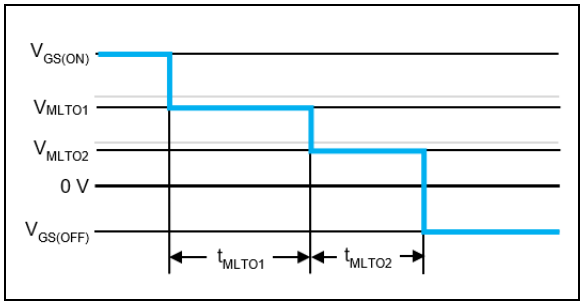

图 11：　　多级关断曲线图

结果

图 12 显示了短路事件期间的三个关键波形：通道 4（绿色）显示，由于在上桥臂 MOSFET 两端跨接 330 mΩ 电阻，电流迅速上升；通道 1（黄色）显示采用多级关断的栅极信号；通道 2（品红色）则显示下桥臂 MOSFET 两端的电压。驱动器在 1.5 µs 后开始切断栅极信号，此时电流已升至 1.48 kA 峰值。由于关断配置受控， 800V 总线上的电压过冲被限制为 280V。

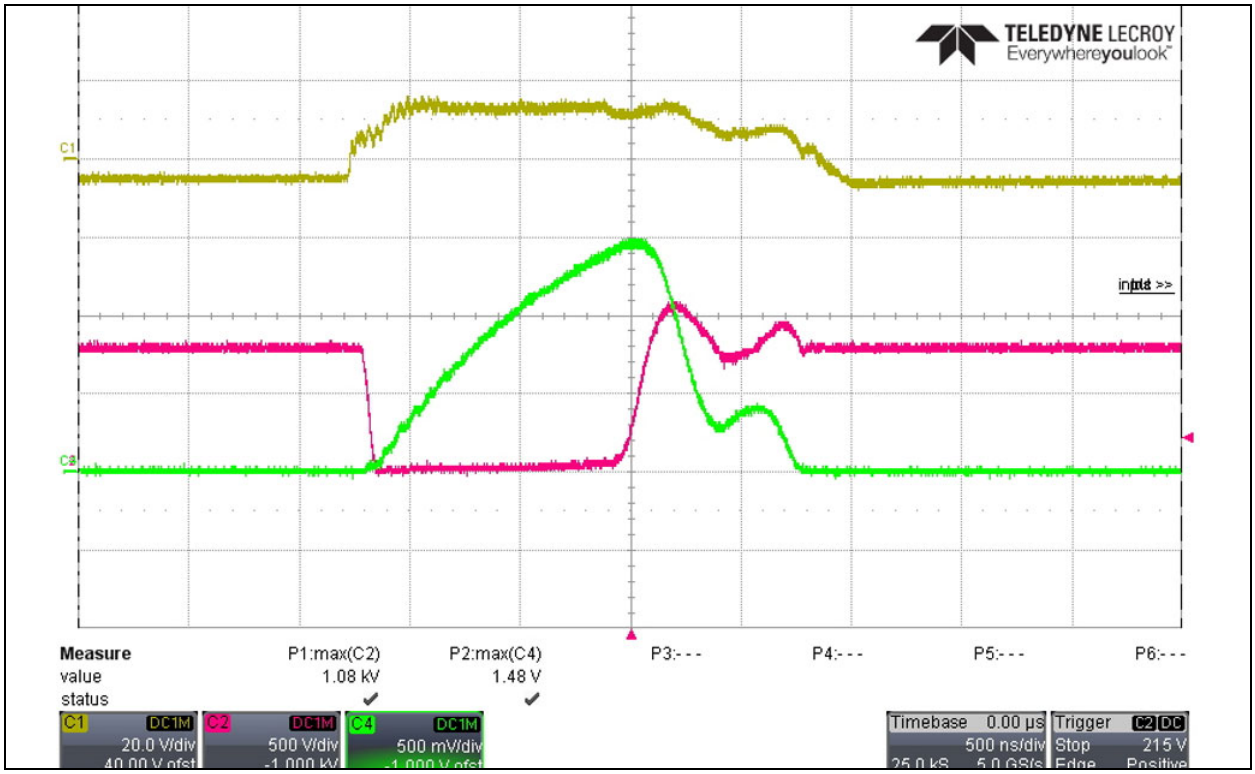

图 12：　　短路波形：V_{GS}（通道 1）、V_{DS}（通道 2）和 I_D（通道 4， 1 A/mV）

总结

双脉冲测试结果表明，62 mm SiC 模块平台是一个稳健的模块。考虑到封装和假定的系统中存在电感，制造商选用的栅极电阻 （Rg on/off = 3.9 Ω）似乎是合理的。

数据手册中的损耗似乎与其他制造商的同等产品一致。

结果表明， AgileSwitch 的 Augmented Switching 技术具有以下性能优势：

1. 可在开关损耗与 Vds 过冲之间调整平衡点
    a) 针对最低开关损耗进行优化时，关断损耗降低 73%
    b) 针对最低 Vds 过冲进行优化时，关断损耗降低 3%
2. 稳健的短路保护
    a) 总短路时间不到 2µs
    b) Vds 过冲和振铃受控

总之，通过 Augmented Switching 技术，支持工程师可对系统性能进行细致的调整。

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下， Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》（Digital Millennium Copyright Act）。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。 Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于Microchip产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices。

Microchip “按原样”提供这些信息。 Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销， Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔， Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中或以其他方式转让任何许可证。

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、EyeOpen、GridTime、IdealBridge、IGaT、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、MarginLink、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mSiC、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、Power MOS IV、Power MOS 7、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、Trusted Time、TSHARC、Turing、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2023, Microchip Technology Incorporated及其子公司版权所有。

ISBN：978-1-6683-2928-3

09/14/21

全球销售及服务网点

美洲

公司总部 Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277
技术支持：
http://www.microchip.com/support
网址：www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 Austin, TX
Tel: 1-512-257-3370

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX
Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC
Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto
Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

澳大利亚 Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-3090-4444

印度 India - New Delhi
Tel: 91-11-4160-8631

印度 India - Pune
Tel: 91-20-4121-0141

日本 Japan - Osaka
Tel: 81-6-6152-7160

日本 Japan - Tokyo
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 Korea - Daegu
Tel: 82-53-744-4301

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-227-8870

菲律宾 Philippines - Manila
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870

泰国 Thailand - Bangkok
Tel: 66-2-694-1351

越南 Vietnam - Ho Chi Minh
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

奥地利 Austria - Wels
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 Finland - Espoo
Tel: 358-9-4520-820

法国 France - Paris
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 Germany - Garching
Tel: 49-8931-9700

德国 Germany - Haan
Tel: 49-2129-3766400

德国 Germany - Heilbronn
Tel: 49-7131-72400

德国 Germany - Karlsruhe
Tel: 49-721-625370

德国 Germany - Munich
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

德国 Germany - Rosenheim
Tel: 49-8031-354-560

以色列 Israel - Ra'anana
Tel: 972-9-744-7705

意大利 Italy - Milan
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

意大利 Italy - Padova
Tel: 39-049-7625286

荷兰 Netherlands - Drunen
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

挪威 Norway - Trondheim
Tel: 47-7288-4388

波兰 Poland - Warsaw
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚 Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

西班牙 Spain - Madrid
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

瑞典 Sweden - Gothenberg
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 Sweden - Stockholm
Tel: 46-8-5090-4654

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820

© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司