



用于 GaN 功率器件的栅极驱动光耦

与硅功率器件相比，氮化镓（GaN）功率器件因其更快的开关能力赋能更高整体系统效率并减小尺寸、降低成本，从而越来越受欢迎。这一技术优势辅以由于 GaN 产量的增加带来的更低成本，增加了其在工业电源和可再生能源逆变器等领域的应用。

作者：Robinson Law，应用工程师和 Chun Keong Tee，产品经理，Broadcom Inc.

博通（Broadcom）公司（前身为安华高科技/Avago Technologies）的栅极驱动光（电）耦（合器）广泛用于驱动硅基半导体，如 IGBT 和功率 MOSFET。光耦用于在控制电路和高压之间提供增强的电绝缘。其抑制高共模噪声的能力可防止在高频开关期间功率半导体的误驱动。本文将讨论 GaN 的优势、栅极驱动要求、栅极驱动设计、测试和性能。

GaN 的优点

氮化镓是一种宽带隙（3.4eV）化合物，由镓和氮组成。带隙是在没有电子的材料连接处形成的区域。宽带隙 GaN 具有高击穿电压和低导通电阻。它具有更高的电子速率和更低的寄生电容，从而提高了开关速度。



GaN 相对于硅的优势可归纳为 3 个要点：

- 更小的系统设计
- 更低的系统成本
- 更高的系统效率

图 1：硅与 GaN 对比，后者的系统体积更小、成本更低

更小体积和更低成本是所用更少、更小外围器件的结果。GaN 可以在反向导通模式下工作，从而消除了外部续流二极管。它可以在高频下工作，从而只需使用更小的滤波器以及更小的电感和变压器等磁性器件。GaN 的发热比硅低 60°C，这将有助于减小散热器的尺寸。

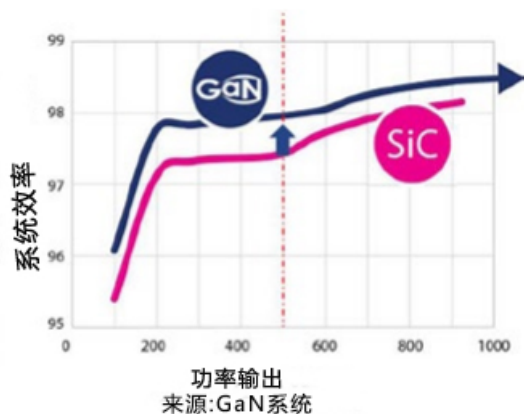


图 2：硅与 GaN 对比，后者系统效率更高

更低的开关和传导损耗带来更高效率。GaN 具有更高的电子速率和更低的寄生电容，可实现低开关损耗。在相同的击穿电压下其尺寸也比硅小，因此导通电阻更小。

	Panasonic	GaN Systems	Brand T	Brand E
Part Number	PGA26E07BA	GS66508P	Txxxxxx	Exxxxxx
Type	Normally Off (GIT)	Normally Off	Normally On (Cascode)	Normally Off
Ratings	600V/26A (56mC)	650/30A (50mC)	650V/26.5A (85mC)	200/32A
$V_{GS}(max)$	-10V/ $I_G < 50mA$	-10/+7V -20/+10V, transient abs max	-15/+15V	-4.6V
$V_{TH}(typ)$	1.2V	1.7V	2.1V	1.6V
C_{in}/Q_g	0.405nF/5nC	0.260nF/5.8nC	1.13nF/2.2nC	0.875nF/8.2nC
dv/dt (kV/us)	> 100kV/us	> 100kV/us	> 100kV/us	> 100kV/us
Gate Drive Requirements				
Gate Voltage, V_{GS}	12V	+6V	+10V	+5V
Gate Current	<1.5A	<1.2A	<0.7A	<0.5A
Notes	Gate DC holding current <10mA	<ul style="list-style-type: none"> V_{GS} 7V abs max Low static gate current 	Slew rate cannot be control due to Cascode topology	<ul style="list-style-type: none"> V_{GS} 6V abs max Low V_{GS} Passivated Die

图 3：GaN 的类型和栅极驱动要求

图 3 显示了不同类型的 GaN 及其栅极驱动要求。例如，Brand E 制造 200V GaN，主要用于 12V DC-DC 转换器等低压应用。Brand T 制造 600V GaN，但是个常开开关。它需要采用共源共栅连接的低压硅 MOS，将其转换为常闭开关，使用起来更安全。由于共源共栅结构，不能通过调节栅极阻抗来控制开关速度。这使微调 EMI（电磁干扰）变得复杂并导致开关损耗。

松下（Panasonic）和 GaN Systems 通过在栅极下使用 P 型势垒结构、以在 0V 栅极偏置时耗尽高迁移率电子来制造常闭开关。由于高电子迁移率，GaN 的阈值 V_{TH} 相对硅 MOS 或 IGBT 要低。

其输入电容也非常小（小于 1nF），只需要 5nC 即可导通。

GaN 开关速度非常快，在设计高开关 dv/dt 时应小心谨慎。控制从 GaN 到栅极驱动器的高 dv/dt 噪声耦合非常重要。否则，要求栅极驱动器必须具有大于 $100kV/\mu s$ 的抗扰度，以防止 GaN 的误开关。

由于松下和 GaN Systems 的 GaN 器件是常闭开关易于使用，因此对栅极驱动的要求与硅 MOS 非常相似。松下的 GaN 具有坚固的栅极，允许 12V 的高栅极电压以快速导通栅极。GaN Systems 建议使用 6V 电压为栅极充电。由于栅极电容和所需的栅极电荷更小，所需的栅极电流相对较低，小于 1.5A。

对于松下的 GaN 来说，需要注意的一点是：栅极需要约 10mA 的直流保持电流才能使其保持在“ON”状态。对于 GaN Systems，需要特别注意确保不超过 7V 的绝对最大栅极电压。

松下GaN的栅极驱动设计



图 4：采用松下的 GaN 和 ACPL-P346 的半桥评估板

图 4 显示了采用松下的 600V 70mΩ X-GaN 晶体管 PGA26E07BA 的半桥评估板。栅极驱动采用两个栅极驱动光耦 ACPL-P346 设计，可直接驱动 GaN 晶体管。

ACPL-P346 是一款基本栅极驱动器光耦，用于隔离和驱动在高 DC 总线电压下工作的 GaN。它具有轨到轨输出、最大输出电流为 2.5A、可快速切换高压和驱动电流、有效可靠地导通和关断 GaN。ACPL-P346 的最大传播延迟时间小于 110ns，典型的上升和下降时间约为 8ns。为隔离高频操作期间的高瞬态噪声，需要非常高的 CMR、共模抑制要达到 $100kV/\mu s$ （最小值）。

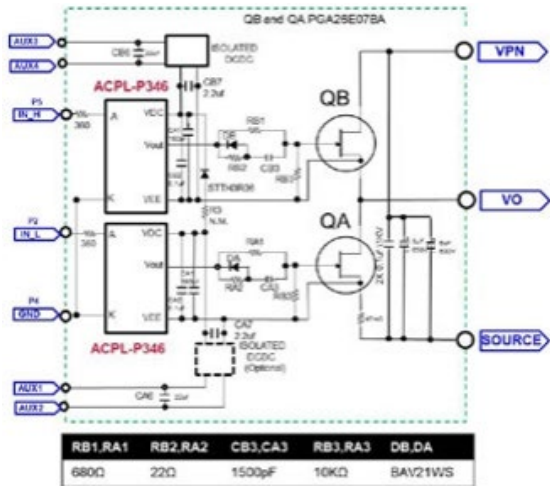


图 5：采用松下 GaN 和 ACPL-P346 的半桥评估板原理图

图 5 显示了半桥评估板和 ACPL-P346 栅极驱动器设计的原理图。GaN 晶体管、QB 和 QA 将需要大约 12.5mA 的导通电流来连续地将晶体管偏置在导通状态。这是由栅极驱动器通过 680Ω 电阻 RB1 和 RA1 实现的。

用于快速导通 GaN 的初始浪涌充电电流由 ACPL-P346 提供，峰值电流由电阻 RB2 和 RA2 限制。电容 CB3 和 CA3 用于通过瞬间增加充电电流来更快地导通 GaN。该板具有可用 2 个隔离 DC-DC 电源分别驱动顶部和底部两个半桥、或采用 1 个带自举功能的 DC-DC 同时驱动两个半桥的灵活性。

GaN 系 GaN 的栅极驱动设计



图 6：采用 GaN Systems 的 GaN 和 ACPL-P346 的半桥评估板

图 6 显示了另一个半桥评估板，它采用 GaN Systems 的 650V E-HEMT GS66508T (30A /50mΩ) GaN 晶体管。该半桥评估板使用两个栅极驱动光耦 ACPLP346 直接驱动 GaN 晶体管。原理图显

示了底部半桥栅极偏置和驱动电路。顶部半桥电路相同。隔离式 DC-DC、5V-10V 转换器用于提供 +6V 和 -4V 双极栅极驱动偏置，以实现更强大的栅极驱动和更好的抗噪性。然后使用 6.2V 齐纳二极管将 10V 分压为 +6.2V 和 -3.8V 偏压。ACPL-P346 栅极驱动输出是 10Ω 栅极限流电阻（用于充电）以及 10Ω、2Ω 并联加上二极管放电的组合。

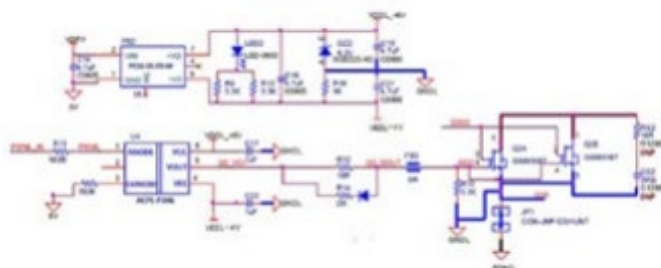


图 7：用于 GaN Systems 半桥评估板的 ACPL-P346 栅极驱动电路原理图。

GaN 半桥评估板测试与性能

使用松下和 GaN Systems 的半桥评估板，对 GaN 和 ACPL-P346 进行了压摆率、开关功率损耗和效率测试。

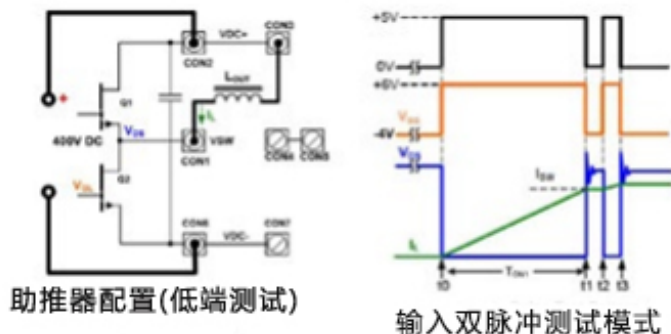


图 8：压摆率和开关功率损耗测试设置和波形

在 VDC+ 和 VSW 之间连接约 120 至 160μH 的电感以形成升压配置，也称为低侧测试。低侧 GaN 晶体管 Q2 在升压模式下工作。400V 总线电压施加于 VDC+/VDC-。双脉冲测试用于在高电压和电流下轻松评估器件开关性能，而无需实际运行于高功率。

施加到 Q2 的第一个脉冲 TON1 的周期决定了开关电流 ISW。t1（关断）和 t2（导通）是测量点，因为当 Q2 处于高开关应力时，它们是半桥电路的硬开关瞬变。压摆率测试在 400V DC 和大约 30A 硬开关下进行。

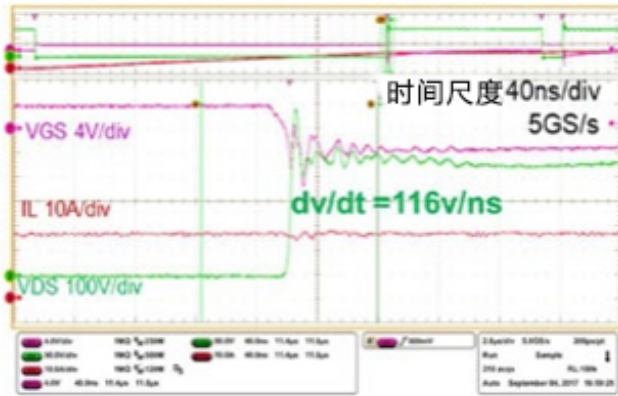


图 9：松下的 GaN 和 ACPL-P346 压摆率测试

Q2 的导通和截止压摆率 (dv/dt) 分别在 t1 (关断) 和 t2 (导通) 下测量。当 GaN 在 400V/30A 硬关断时，测得的最高压摆率超过 110kV / μ s。

ACPL-P346 具有最小 CMR，共模抑制为 100kV/ μ s。换句话说，ACPL-P346 可以隔离 GaN 开关的高瞬态 dv/dt 噪声。示波器图片显示 GaN 的快速压摆率不影响栅极驱动输出和栅极电压。

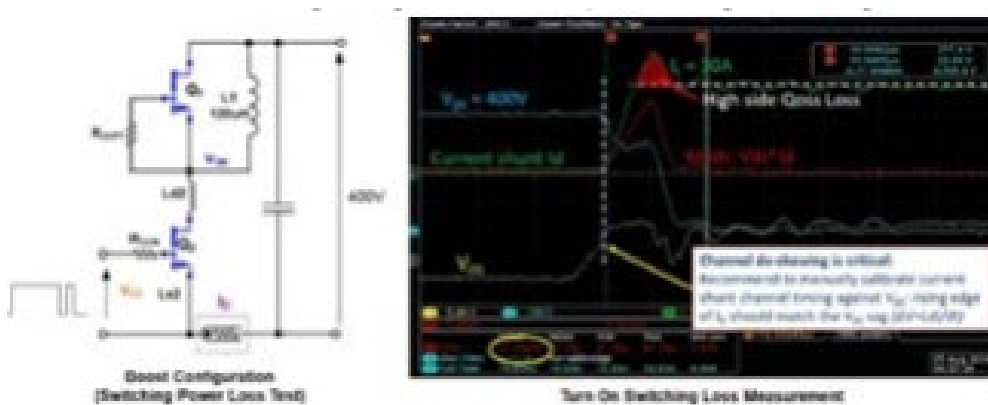


图 10：开关功率损耗测试设置和波形

开关损耗测试使用相同的升压配置，并安装了用于 ID 测量的电流传感器。相同的双脉冲信号和压摆率测试的时序用于功率损耗测量。当 GaN 在目标电流水平下导通或关闭时，在监测点处进行测量。示波器上的数学函数用于查找 VDS 和 IDS 的乘积。然后使用示波器上的测量功能来查找功率损耗，该功率损耗是曲线下的面积。

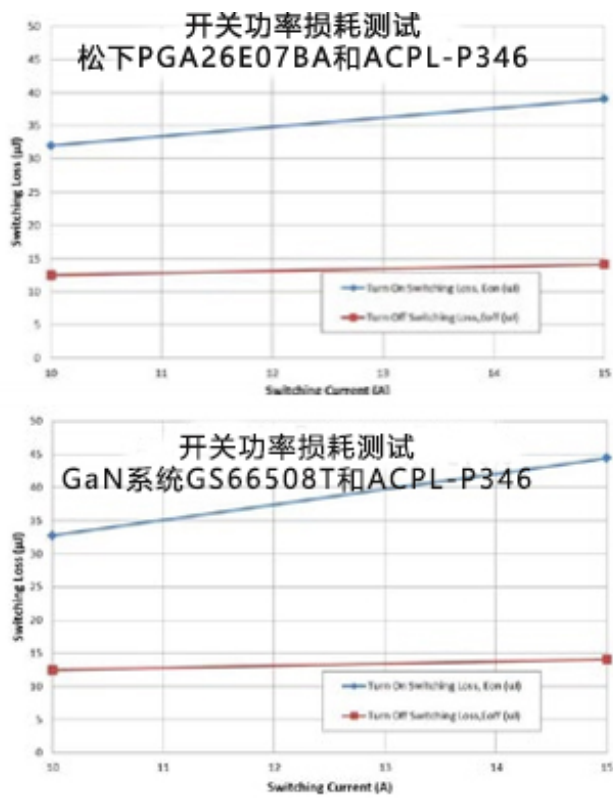


图 11：开关功率损耗测量

关断功率损耗用红线表示，无论电感负载电流如何，两种 GaN 功率损耗都保持在 $15\mu\text{J}$ 以下。
 导通功率损耗用蓝线表示，两款 GaN 在 15A 时都显示出约 $40\mu\text{J}$ 的低损耗。

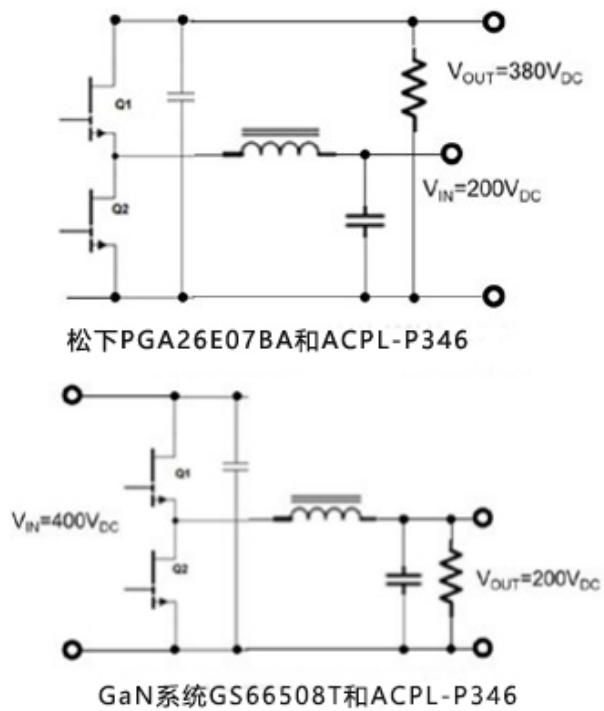


图 12：效率测试设置

半桥评估板作为 DC-DC 转换器连接，以测试硬开关操作中 GaN 的效率。松下的 GaN DC-DC 以 200V 至 380V 的升压配置连接；而 GaN Systems 的 DC-DC 以 400V 至 200V 的降压配置连接（Q1 导通以对电感充电；关断以允许电感电流继续通过输出电容以及作为续流二极管的 Q2 放电）。两个转换器均工作在 100 kHz、室温，对不同功率的效率运行了测试。

两种转换器都显示出大约 99% 的高转换效率。

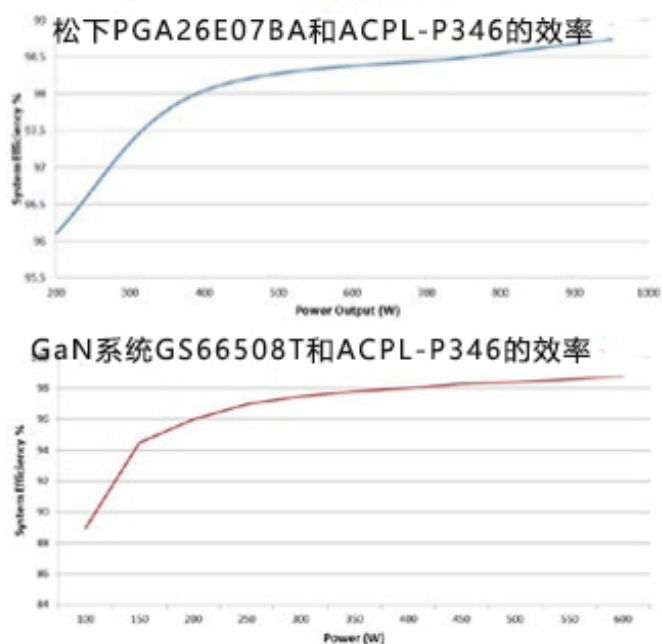


图 13：效率测试测量

声明

博通感谢 Panasonic Semiconductor Solutions Singapore 和 GaN Systems 的应用团队提供的技术支持。

参考

- 《具有轨到轨输出的 ACPL-P346/ACPL-W346 2.5A 输出电流功率和 SiC MOSFET 栅极驱动光耦》，Broadcom Inc., AV02-4078EN。
- 《ACPL-P346 松下 X-GaN 晶体管 PGA26E07BA 半桥评估板》，Broadcom Inc., ACPL-P346-X-GaNRM100。

- 《ACPL-P346 GaN Systems GaN E-HEMT GS66508T 半桥评估板》，Broadcom Inc., ACPL-P346-RefDesign-RM101。
- 《PGA26E07BA 数据表》松下半导体。
- 《GS66508T 顶侧冷却 650V E-mode GaN 晶体管数据表（草案版）》，GaN Systems。
- 《GaN 增强模式 HEMT 的 GN001 应用指南设计》，GaN Systems。