

## ACPL-352

### 使用ACPL-352驱动及保护松下X-GaN晶体管

## 引言

氮化镓（GaN）功率半导体器件正在快速进入商用化市场，与传统硅基功率半导体器件相比它们可以带来巨大的好处。氮化镓器件具有更低的导通电阻，因此可以提高总的系统效率，而且其更高的开关能力可以降低整个系统的体积和成本。技术上的好处加上更低的成本使得氮化镓功率半导体器件在工业电源和可再生能源逆变器等应用中得到了迅速普及。

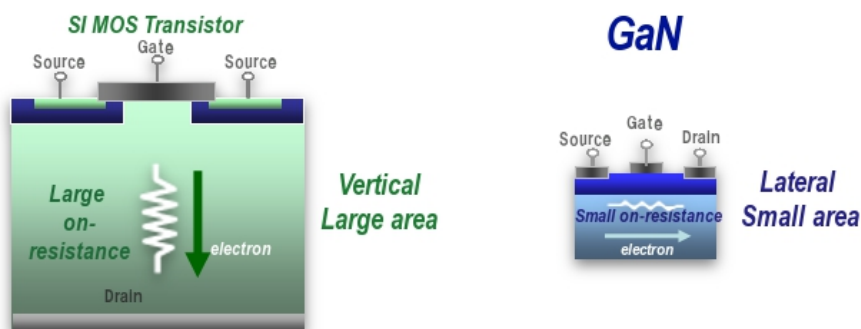
安华高科技公司的栅极驱动光耦广泛用于驱动IGBT和功率MOSFET等硅基功率半导体器件。光耦的作用是在控制电路和高压电路之间实现增强型电流隔离。其抑制高共模噪声的能力可以防止电路在高频开关期间错误地驱动功率半导体器件。本文将讨论如何使用下一代栅极驱动光耦来保护和驱动氮化镓器件。

## 氮化镓器件的优势

氮化镓是一种由镓和氮组成的宽带隙（3.4eV）化合物。带隙是指在材料结点处形成的一个不存在电子的区域。宽带隙氮化镓器件具有高击穿电压和低导通电阻特性。与为了减小导通电阻而要求更大芯片面积的传统硅晶体管不同，氮化镓器件的尺寸比较小，因此可以减小寄生电容，实现高速开关，方便产品的微型化设计。之所以能实现较低的导通电阻，是因为这种功率半导体器件的导通电阻反比于击穿电压的立方。换句话说，氮化镓器件的导通电阻有望做到比硅器件的极限值还低3个数量级。另外，氮化镓器件具有很高的电子饱和速度，因此是高速应用的理想之选。

功率半导体是电能转换应用中的一种关键器件，工作时的功率非常大，因此优化这些器件的效率以便最大限度地降低它们在工作期间的能量损失很重要。氮化镓是下一代功率半导体器件，由于具有微型化、高击穿电压和高开关速度的特性，所以能够最大限度地减少能量损失。

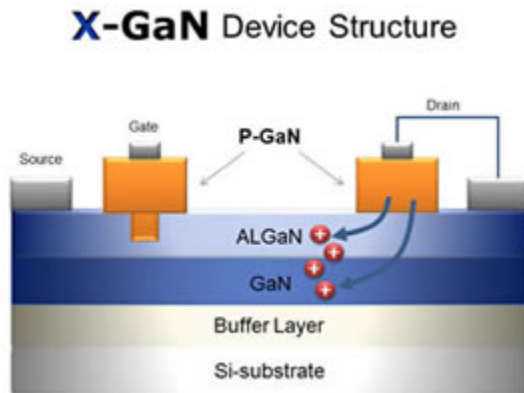
图1：硅晶体管与氮化镓晶体管的结构与尺寸对比。



然而，大多数氮化镓器件是常通器件，也即意味着栅极没有施加电压时其源极和漏极之间就是导通的。为了阻止导通，必须施加负电压使导通沟道逆转。如果栅极不能得到正确地控制，常通晶体管就会给系统带来危险。因此具有常断属性的硅晶体管更适合危险的高压应用。

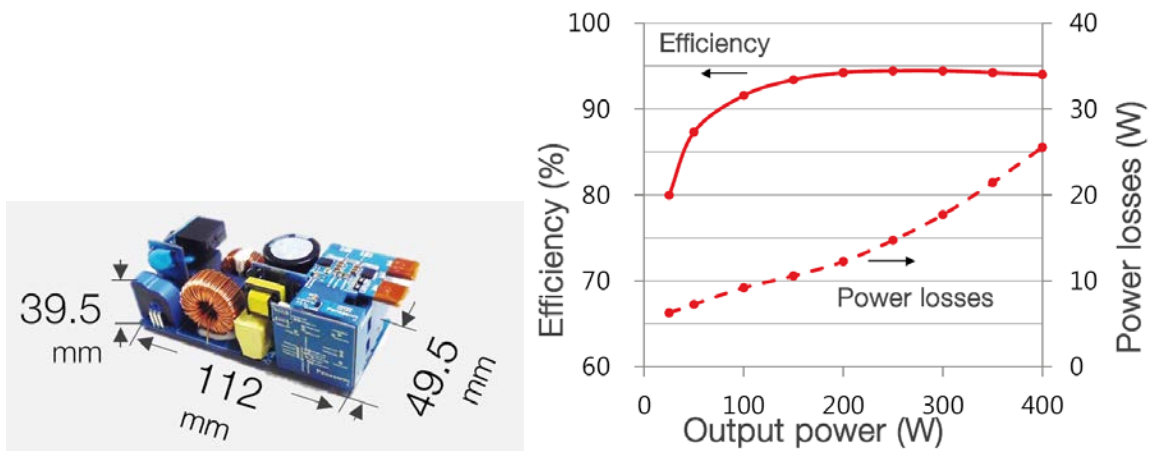
为了加快氮化镓器件的普及，松下的X-GaN™产品采用了常断型栅极注入晶体管（GIT）结构。这种结构采用P型氮化镓栅极，并且在栅极下方使用了扩散型AlGaIn沟道。与此同时，这种P型氮化镓器件在漏极附近增加了空穴，因此可以与高压电子重新组合。这种方法可以解决电流崩溃问题，即高压工作时电子受困于沟道附近进而增加晶体管导通电阻的问题。如果不能很好地控制导通电阻的增加，氮化镓器件将发生过热现象，并随着时间的推移而损坏。松下的氮化镓晶体管能够在高达850V的条件下不发生电流崩溃。

图2：松下X-GaN™晶体管结构。



松下公司完成了世界上最小的400W级全功能电源的概念性演示，其中的电源转换电路PFC和LLC分别工作在100kHz和280kHz。正是这种高频率将电源的成本和体积减少了30%以上。这种微型电源的尺寸是11.2cm × 4.95cm × 3.95cm，有效功率密度为1.83W/cm<sup>3</sup>，转换效率高达94%，并且具有很低的开关损耗和传导损耗。

图3：松下推出世界上最紧凑、转换效率高达94%的400W电源。



## 氮化镓市场及其普及情况

现在人们已经广泛地认识到氮化镓是硅的可靠替代技术。最近对GaN Systems和Transphorm等氮化镓新创企业的金融投资以及英飞凌与松下建立的合作伙伴关系都表明市场对氮化镓器件有很强的信心。氮化镓器件具有庞大的市场总量

(TAM)，像PF、电动汽车/混合动力汽车和光伏逆变器就是氮化镓的最早采用者之一。2014年，日本安川电气（Yaskawa Electric）公司发布了世界上第一款使用氮化镓功率半导体器件设计的光伏逆变器。这款光伏逆变器工作时无需冷却风扇，体积只有竞争产品的60%，总体峰值效率超过98%。

安华高栅极驱动光耦被广泛用于驱动诸如IGBT等硅基半导体器件。本文将讨论如何使用改进后的下一代栅极驱动光耦来驱动和保护氮化镓器件。

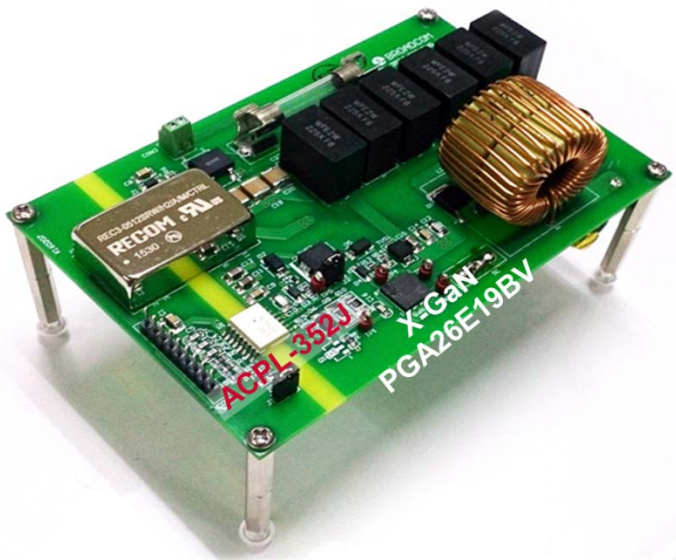
## 氮化镓晶体管和栅极驱动光耦

为了确定适合氮化镓器件使用的栅极驱动器，博通公司使用工作在100kHz、100-150V、5A的斩波电路板对栅极驱动光耦ACPL-352J和松下的氮化镓晶体管PGA26E19BA进行了评估。

ACPL-352J是业界具有最大输出电流的5A智能栅极驱动光耦，其峰值输出电流加上宽的工作电压范围使得ACPL-352J是直接驱动氮化镓晶体管的理想器件。该器件具有100ns的快速传播延时、优异的时序摆率性能，并且具有超过50kV/μs的高共模瞬态抑制（CMTI）性能。它还能向氮化镓器件提供过流保护和故障防护功能性安全报告。这种全功能的栅极驱动光耦采用紧凑的表贴SO-16封装，可提供IEC/EN/DIN、UL和CSA等安规认证的增强型绝缘性能。

PGA26E19BA是一款600V、10A的氮化镓增强型晶体管，它采用松下专有的栅极注入晶体管（GIT）技术，单个器件就能实现常断式工作。这种开关速度特别快的X-GaN器件在高达850V的条件下都不发生电流崩溃，并且具有零恢复损耗特性。

图4：采用ACPL-352J和PGA26E19BA的100-150V、5A斩波电路板。



## 驱动氮化镓晶体管

图5显示了ACPL-352J栅极驱动输出、VOU TP/MClamp、VOU TN以及用于开关氮化镓晶体管的外部电阻和电容。完整的斩波电路板原理图详见图11。

图5：用于氮化镓晶体管的ACPL-352J驱动电路。

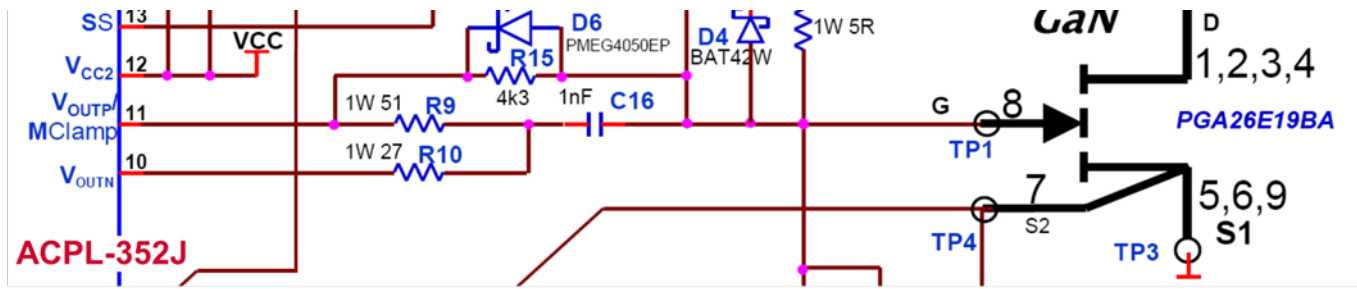
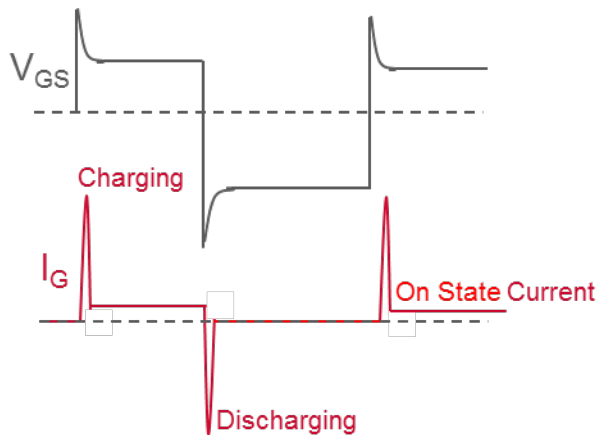


图6：氮化镓晶体管的栅极电流和电压开关波形。



ACPL-352J VOUTP提供快速导通氮化镓器件所需的初始启动充电电流，峰值电流大小受限于R9。C16用于瞬时增加充电电流，以便使氮化镓器件更快的导通。所需的IG\_CHARGE电流可以通过氮化镓的Qgd和导通时间t（比如10ns）进行计算。

#### 公式1

$$I_{G\_CHARGE} = Q_{gd} / \Delta t = 4.5 \text{ nC} / 10 \text{ ns} = 450 \text{ mA}$$

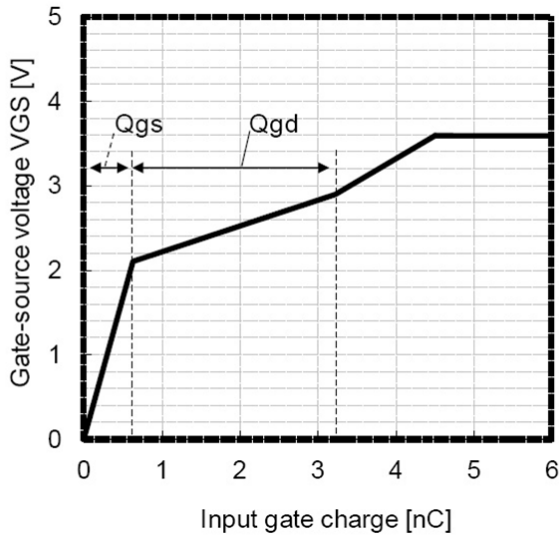
R9的值可以通过栅极驱动电源电压VCC、氮化镓器件的栅极峰值电压Vplateau和IG\_CHARGE进行计算：

#### 公式2

$$R9 = (V_{CC} - V_{plateau}) / I_{G\_CHARGE} = (24\text{V} - 2.9\text{V}) / 450\text{mA} = 46\Omega$$

R9阻值可以选择51Ω。

“加速”电容C16可以用Qg特征图形（图形显示氮化镓器件导通所需的栅极电荷为4.5nC）进行计算。

图7：氮化镓晶体管的 $V_{GS}$ 与 $Q_g$ 特性。

## 公式3

$$C16 > Q_g / (V_{CC} - V_{GS} - \Delta V(\text{neg})) = 4.5 \text{ nC} / (24\text{V} - 3.6\text{V} - 5\text{V}) = 292 \text{ pF}$$

最终C16选用了容量更高的1nF电容，以确保累积更多的电荷使氮化镓的导通更快。氮化镓晶体管需要4.75mA的导通电流使VGS二极管持续偏置在3.6V，进而使晶体管保持在导通状态。这就是提供的VOUTP，R15的值可以这样计算：

## 公式4

$$R15 = (V_{CC} - V_{GSF}) / I_{G\_ONSTATE} = (24\text{V} - 3.6\text{V}) / 4.75 \text{ mA} = 4.3 \text{ k}\Omega$$

R15阻值可以选择4.3kΩ。

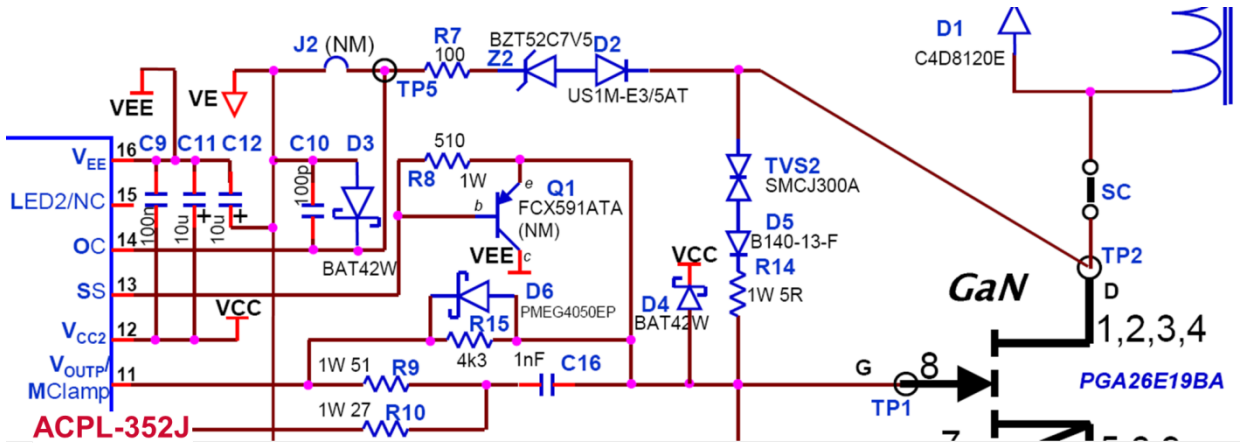
关断氮化镓或给氮化镓栅极放电是由ACPL-352J的VOUTN和R10完成的。ACPL-352J连接一个双向电源，栅极通过VOUTN放电到-9V。与此同时，当栅极放电到-7V时，有源米勒钳位管（Mclamp）将导通。氮化镓晶体管具有很低的典型栅极阈值电压1.2V。负的栅极电压和有源米勒钳位管有助于使晶体管保持在关断状态，而分流寄生米勒电流，防止晶体管发生错误的导通。峰值放电栅极电流可以这样计算：

## 公式5

$$I_{G\_DISCHARGE} = (V_{GSF} - V_{EE2}) / R10 = (3.6\text{V} - (-9\text{V})) / 27\Omega = 0.467\text{A}$$

## 保护氮化镓晶体管

图8：用于氮化镓晶体管的ACPL-352J过流保护电路。



ACPL-352J的OC引脚通过高压阻流二极管D2监视氮化镓晶体管的漏-源电压。斩波器设计工作电流为5A，过流阈值设为7A。当发生过流时，氮化镓晶体管的VDS增加到约0.8V。ACPL-352J的内部过流阈值电压VOC是9V。过流检测阈值可以通过齐纳二极管Z2进行设定。

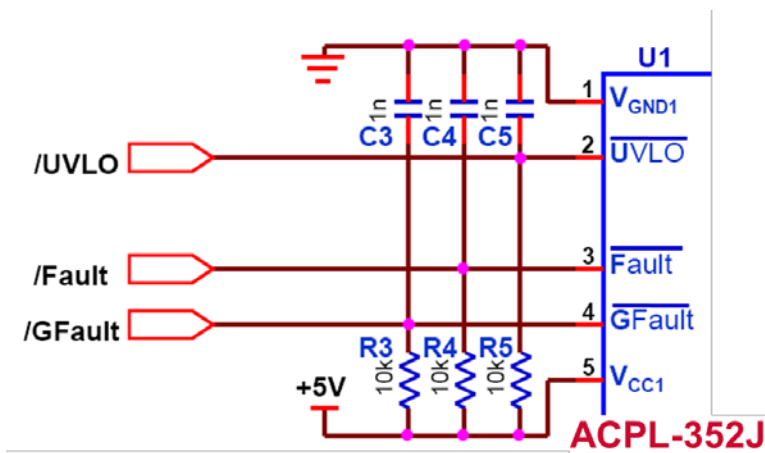
公式6

$$Z2 = V_{OC} - V_{D2} - V_{DS\_OVERCURRENT} = 9 - 0.7 - 0.8 = 7.5V$$

当发生过流时，如果氮化镓被突然切断，那么在氮化镓晶体管的漏极和源极之间可能会产生由负载或任何寄生电感引起的高过冲电压。当这种过冲电压超过击穿电压时，将损坏氮化镓器件。为了尽量减小这种破坏性的过冲电压，ACPL-352J的13引脚SS在检测到过流时会开启软关断功能。氮化镓的栅极电压会缓慢地减小到低电平的关断状态。外部晶体管Q1和电阻R8用来调整用于降低过冲电压的软关断的速度。

整个过流保护是通过隔离反馈路径向控制器报告/Fault故障完成的。除了过流故障外，ACPL-352J还能报告高侧欠压失锁故障 (/UVLO) 和氮化镓栅极状态故障 (/Gfault)。

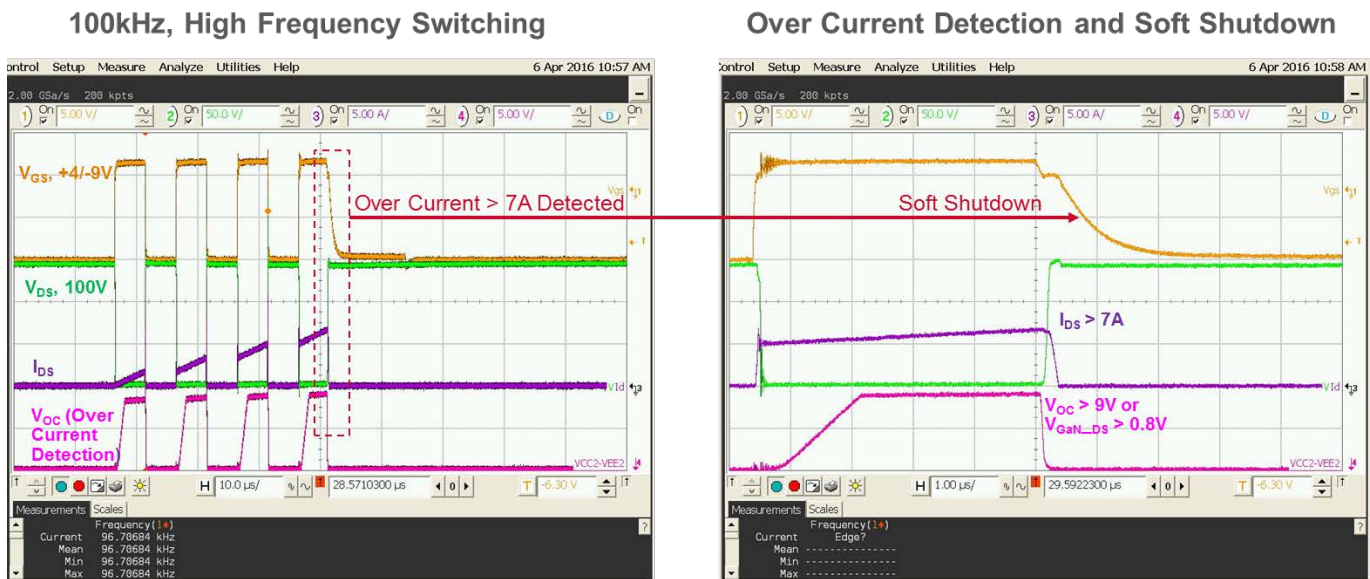
图9：ACPL-352J功能性安全故障报告。



## 斩波电路板开关性能

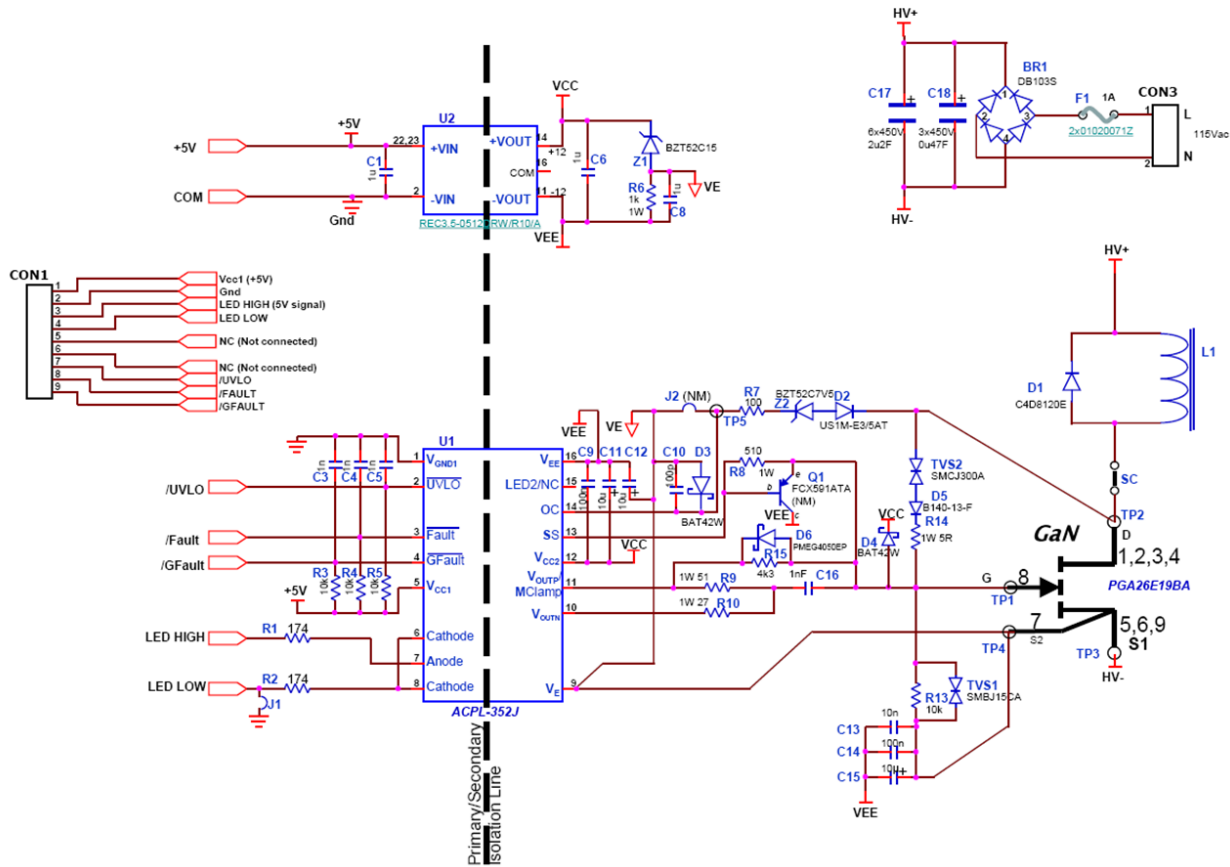
斩波电路板设计以100kHz频率开关X-GaN晶体管，直流总线电压为100-150V。氮化镓晶体管的标称工作漏极电流为5A，过流阈值设为7A。图10显示了氮化镓晶体管VGS、VDS和IDS的开关波形。由于斩波电路板没有连接任何负载来耗散能量，因此每次开关脉冲都会使IDS增加，最终触发ACPL-352J的过流检测阈值VOC。一旦检测到过流，右边的波形就会迅速进入软关断过程。

图10：斩波电路板的开关性能、过流检测及软关断。



## 其它设计考虑

图11：斩波电路板的原理图。



## 材料清单

Designator	Descriptions	Manufacture Name	Manufacturer Part Number
C1, C6, C8	CAPACITOR, X7R, 1206, 50V, 1μF	MULTICOMP	MCSH31B105K500CT
C3, C4,C5	CAPACITOR, 0805, 1nF, 25V	TDK Corporation	C2012C0G1E103J060AA
C9, C14	Capacitor F X7R 100nF 50V 10%	KEMET	C1206C104K5RACTU
C10	CAPACITOR, X7R, 1206, 50V, 100pF	Samsung-Electro	CL31C101JBCNANC
C11, C12, C15	Capacitor MLCC X7R 10μF 25V 10%	TAIYO YUDEN	TMK316B7106KL-TD
C13	Capacitor F X7R 10nF 50V 10%	Murata Electronics	GRM3195C1H113JA01D
C16	Capacitor X7R 1nF 50V 10%	YAGEO (PHYCOMP)	CC0805KRX7R9BB152
C17a,b,c	Capacitor Metal Film 450VDC 2.2μF	Panasonic	ECW-FE2W225K
C18a,b,c	Capacitor X7T, 630V, 0.47μF	TDK Corporation	C5750X7T2J474K
D1	DIODE, Schottky, 1200V	Cree Inc.	C4D08120E

D2	Diode, FRD, 1000V	VISHAY	US1M-E3/5AT
D3, D4	DIODE, SCKY RECTI	MULTICOMP	BAT42W
D5	DIODE, SCKY RECTI	DIODES INC.	B140-13-F
D6	DIODE, SCKY RECTI	NXP	PMEG4050EP
Z1	Diode, Zener 15V	DIODES INC.	BZT52C15V
Z2	Diode, Zener 7V5	DIODES INC.	BZT52C7V5
BR1	Diode, Bridge AC230V	MULTICOMP	DB103S
TVS1	TVS 15V bidirectional	Fairchild	SMBJ15CA
TVS2	TVS 300V unidirectional	Littelfuse Inc.	SMCJ300A
R1, R2	RESISTOR, 0805, 330 OHM, 5%	Stackpole	RMCF0805JT330R
R3, R4, R5, R13	RESISTOR, 0805, 10k OHM, 5%	Stackpole	RMCF0805JT10K0
R6	RESISTOR, 0805, 1k OHM, 5%	Yageo	RC0805JR-071KL
R7	RESISTOR, 0805, 100 OHM, 5%	Panasonic	ERJ-6GEYJ101V
R8	RESISTOR, 0805, 510 OHM, 5%	Yageo	RC0805JR-071KL
R10	RESISTOR, 1210, 27 Ohm, 1W	Rohm	MCR25JZHJ270
R14	RESISTOR, 2512, 5R1 Ohm, 1W	Stackpole	RMCF2512JT5R10
R15	RESISTOR, 0805, 4k3 OHM, 5%	Stackpole	RMCF0805JG4K30
R9	RESISTOR, 2512, 51 OHM, 1W	Stackpole	RMCF2512JT51R0
J1~J2	HEADER, 2.54MM, 2WAY	MOLEX	22-27-2021
CON1	HEADER, 2.54MM, 9WAY	Amphenol FCI	68000-103HLF
CON2	HEADER, 2.54MM, 3WAY	MOLEX	WM4112-ND
CON3	Terminal Block 125Vac 2Way	Phoenix Contact	1725656
CNT1,2,3	Connector, Agilent Probe	Oxley	Consign
CNT4a,b	Fuse Holder	Littelfuse Inc.	01020071Z
U1	Isolated Gate Driver Optocoupler	Broadcom	ACPL-352J
F1	Fuse, Bussman (FNM-1)	Bussman	FNM-1
GaN	Transistor, GaN	Panasonic	PGA26E19BA
SW1	Switch Toggle, SPST	Eaton	8444k4
L1	Inductor	Transmore	Consign
U2	Dc-Dc converter	RECOM ECONOLINE	REC3-0512DRW
Q1	TRANS PNP 40V 1A SOT-89	Diodes Incorporated	FCX591ATA

Broadcom, the pulse logo, Connecting everything, Avago Technologies, Avago, and the A logo are among the trademarks of Broadcom and/or its affiliates in the United States, certain other countries and/or the EU.

Copyright © 2017 by Broadcom. All Rights Reserved.

The term “Broadcom” refers to Broadcom Limited and/or its subsidiaries. For more information, please visit [www.broadcom.com](http://www.broadcom.com).

Broadcom reserves the right to make changes without further notice to any products or data herein to improve reliability, function, or design. Information furnished by Broadcom is believed to be accurate and reliable. However, Broadcom does not assume any liability arising out of the application or use of this information, nor the application or use of any product or circuit described herein, neither does it convey any license under its patent rights nor the rights of others.

