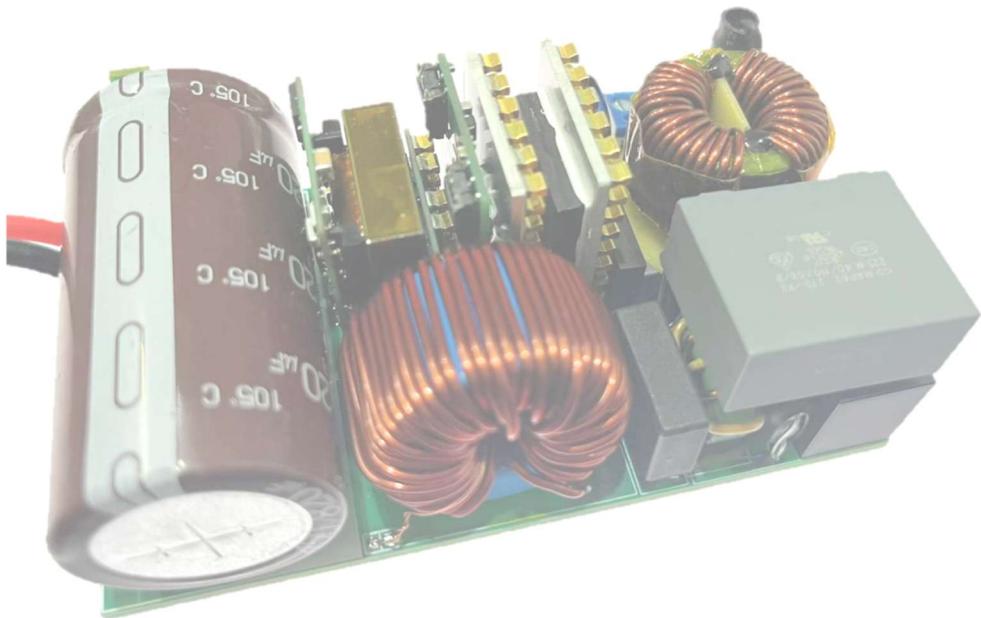


# 2kW High-Efficiency Bridgeless-Boost PFC with CloudSemi GaN BDS

## ***Evaluation Board Manual***

**CG-EVB-BPS-PFC-2KW**



*Note: This evaluation board is intended to demonstrate CloudSemi E-mode GaN device technology and is for demonstration purposes only. No guarantees are made for standards compliance.*

# 基于 GaN BDS 器件 2kW 高效率高功率密度 双向开关前置升压 APFC 评估板

输入电压: 90 Vac to 264 Vac, 47 Hz to 63 Hz

输出电压: 400 Vdc  $\pm 5$  Vdc

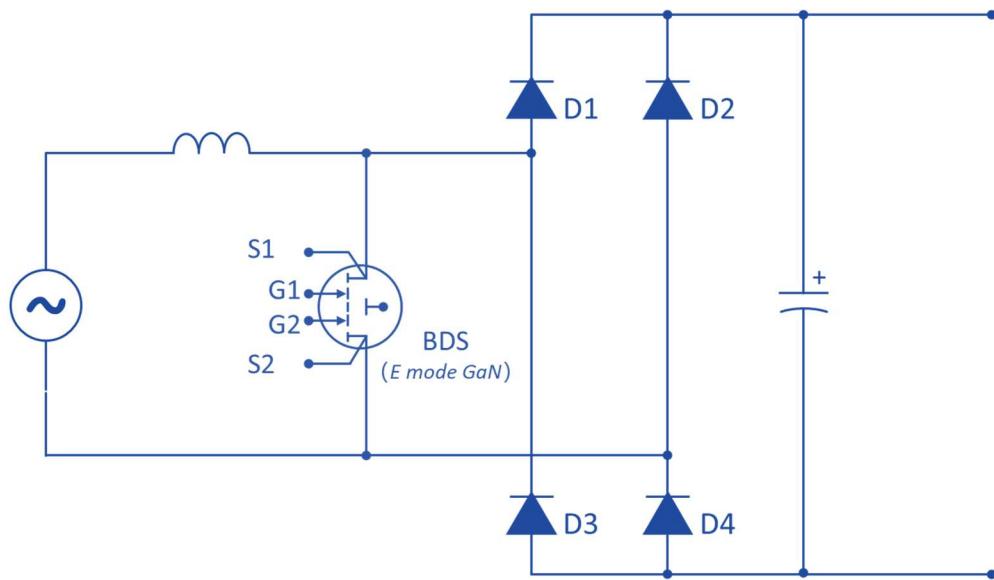
输出功率: 2000W(Typ)

GaN 开关频率: 65 kHz

GaN 开关元件: CGK65090TBD

峰值效率: >98.4%

拓扑: 如下图所示



## 目录

1. 介绍	4
2. 评估板的主要特点	5
2.1 基本电气性能	5
2.2 评估板基本保护功能	5
2.3 评估板基本结构	5
2.4 评估板电路结构	6
3. 评估板的控制原理	7
4. E-mode GaN 双向开关 (BDS) 在 APFC 的应用	9
4.1 双向开关的发展历程	9
4.2 双向开关前置升压 APFC 的工作过程	9
4.3 双向开关前置升压 APFC 中 GaN BDS 和二极管的工作状态	11
4.4 为什么采用 E-mode GaN BDS?	13
5. CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的详细设计	16
5.1 双向开关前置升压 APFC 分析	16
5.2 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的详细设计	17
5.3 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的测试结果	19
附录：云嫁双向开关器件 CGK65090TBD	23

## 双向开关前置升压 APFC 评估板 (CG-EVB-BDS-PFC-2KW)

### 1. 介绍

CG-EVB-BDS-PFC-2KW 双向开关前置升压 APFC 是云稼半导体专门为国内的数据中心、通讯电源、电机驱动、适配器等应用领域开发的一块评估板 (DEMO)。

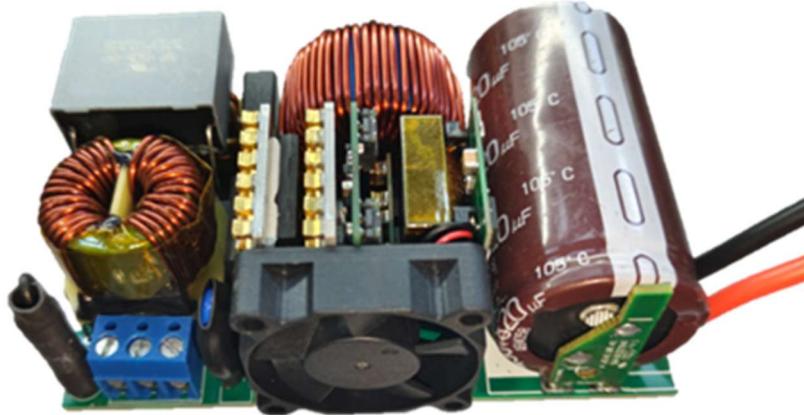


图 1 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板外形

- 本说明概括了 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 的主要特性、关键数据等信息。
- 本评估板支持客户在应用双向前置升压 APFC 技术之前进行应用设计的初中级阶段的评估和初步分析。
- CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板整体结构紧凑，非常适合一些对产品体积大小有特殊要求客户的需求。



图 2 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的紧凑尺寸

## 2. 评估板的主要特点

### 2.1 基本电气性能

该评估板的基本的基本电气性能如下表所示:

表 1:

编号	名称	参数	单位	备注
1	输入典型电压	220	V <sub>ac</sub>	
2	典型 APF 值	0.996	/	100% load
3	典型 THDi 值	3%	/	100% load
4	输出典型电压	400	V <sub>dc</sub>	
5	输出电压纹波	≤25	V	峰峰值@满载
6	输出典型功率	2	kW	
7	典型工作环温	25	°C	

### 2.2 评估板基本保护功能

表 2:

编号	名称	参数	单位	备注
1	输入过压保护	-	V	不做参考*
2	输入欠压保护	-	V	不做参考*
3	输入过流保护	-	A	不做参考*
4	输出过压保护	-	V	不做参考*
5	过温保护	-	°C	不做参考*

\* 此评估板仅作为功能展示，并未在保护功能上做太多工作。

### 2.3 评估板基本结构

此评估板主要组成部件如下图所示:



图 3 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 外形及其组成



[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)



[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>

CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板主要由以下几个主要部分组成：

表 3：

• 输入保险丝	x1
• 差模压敏电阻	x1
• 输入共模电感	x2
• 软启动电路（水泥电阻、继电器及其驱动电路等）	x1
• 双向开关（云稼 <a href="#">GCK65090TBD</a> ）	x1
• 双向开关驱动芯片（半桥隔离驱动）	x1
• 高频二极管桥臂（SiC SBD）	x1
• 低频二极管桥臂（整流桥）	x1
• 母线电容（铝电解）	x1
• 母线电容（MLCC@630V）	x4
• 辅助电源	x1

注：需要指出的是双向开关前置式升压 APFC 和图腾柱无桥 APFC 是不一样的，没有真正意义上的所谓高频桥臂和低频桥臂。两个桥臂在开关过程中既有低频的工作状态也有高频的工作状态，后文会对此进行相关阐述。

## 2.4 评估板电路结构

此双向开关前置升压 APFC 的电路结构框图如下图所示：

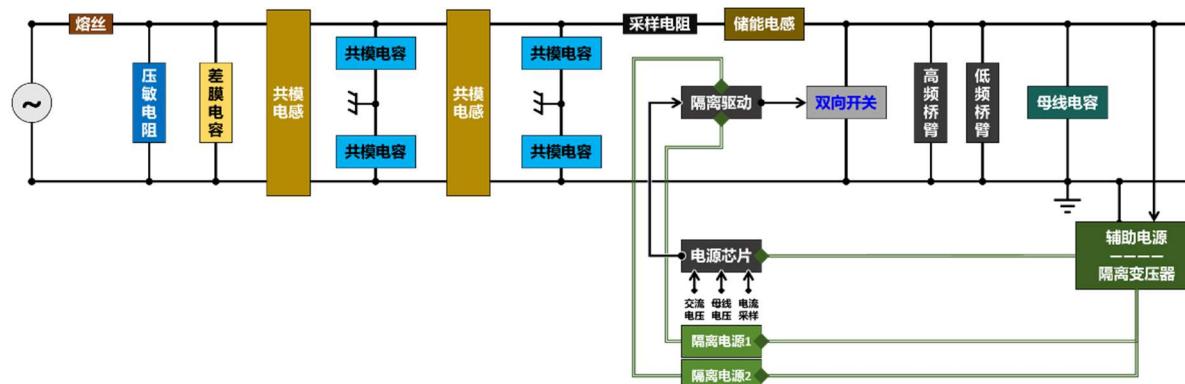


图 4 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的电路结构框图

### 3. 评估板的控制原理

CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板采用国内梵塔的高性能多模式图腾柱 APFC 控制器 FAN6616，见下图：

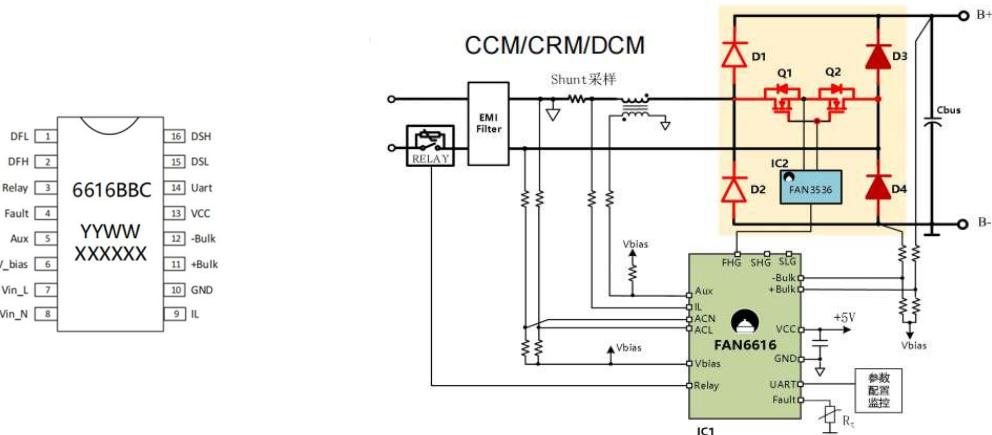


图 5 FAN6616 的 SOIC-16 管脚定义及推荐电路图

该控制器采用的是双环 APFC 控制原理，即在 APFC 电路里，采用电压环为外环，电流环为内环的双闭环控制，见下图所示：

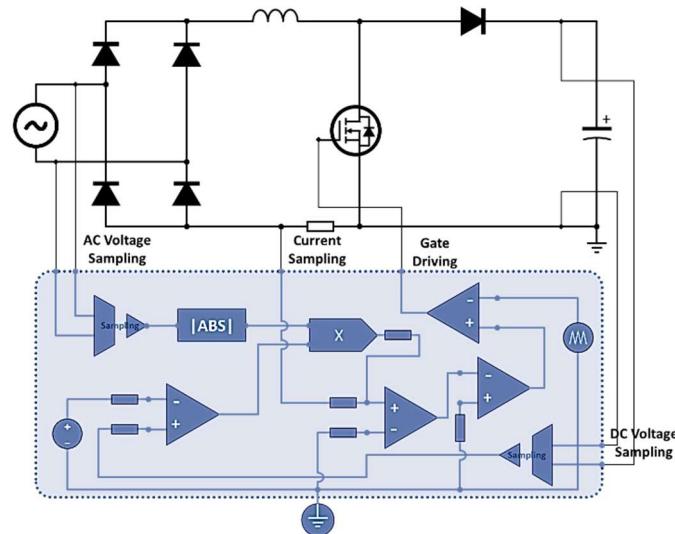


图 6 APFC 双环控制原理图

交流电压采样电路和直流母线电压采样电路组成了电压环，他们的乘积和电流采样电路的结果在运算放大器上进行比较，输出的模拟电压和高频三角波进行对比最终形成 PWM 来驱动开关管。其中电压环通常被称为外环，电流环称为内环。电流环的响应迅速，而电压环相对较慢。

根据对 APFC 控制环路的认识，云稼半导体应用部搭建了仿真模型进行模拟，结果见下图：



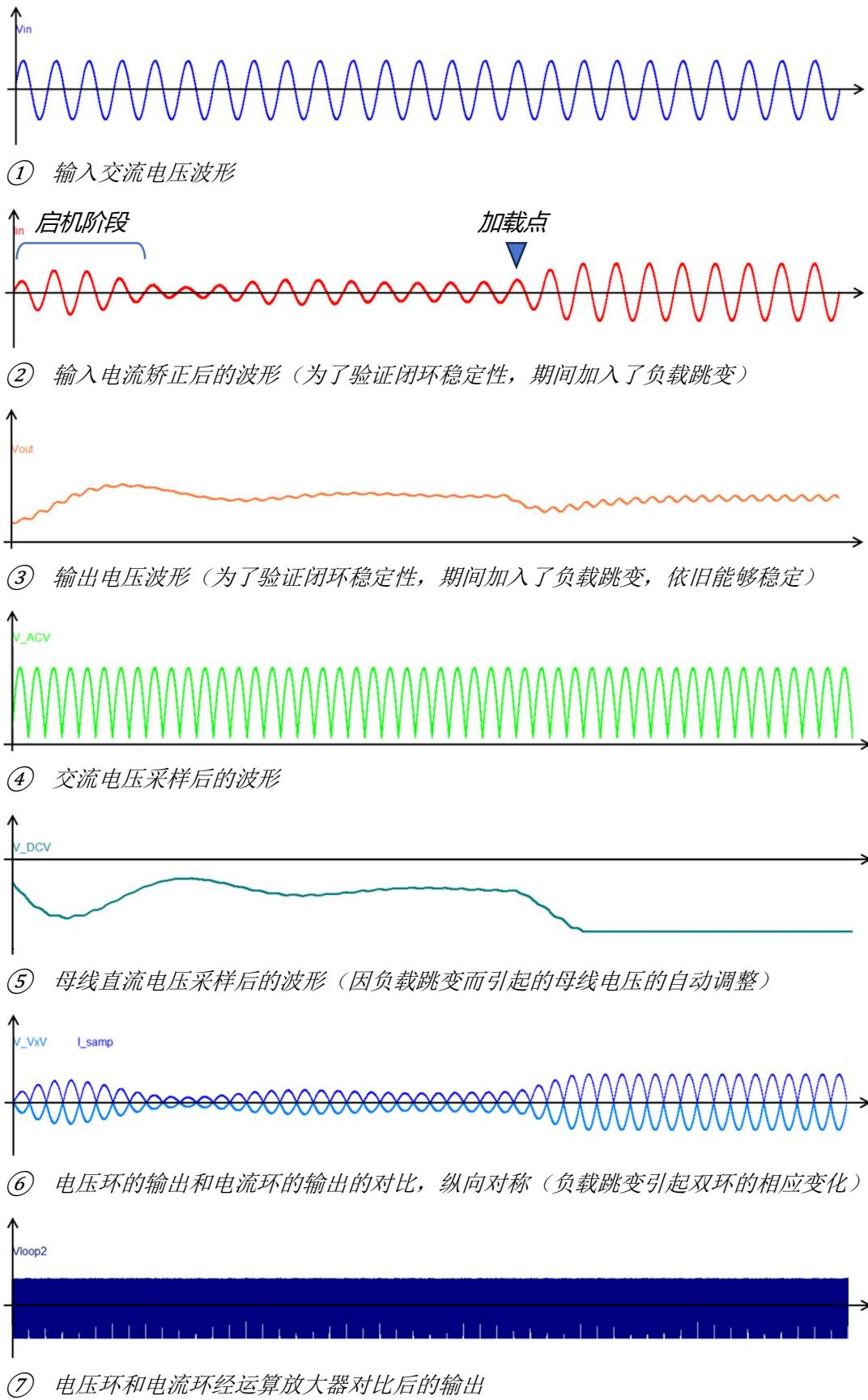


图 7 双向开关前置升压 APFC 闭环仿真结果

## 4. E-mode GaN 双向开关 (BDS) 在 APFC 的应用

### 4.1 双向开关的发展历程

双向开关前置升压 APFC (The Bridgeless-Boost PFC with a Bidirectional Switch) 是无桥 APFC 其中的一个应用，其特点是采用了双向开关。这是一种用于实现高功率因数、高效能量转换的电源电路设计，常应用于对功率因数和能效要求较高的场合，如储能系统、电动汽车充电、工业电源等。

在早期此电路拓扑只能采用两个 MOSFET 器件对管的方式来实现双向开关。普遍采用的是共源方式，这样两个开关管可以分享同一个驱动器。随着 GaN 技术的发展，人们发现得益于 GaN 的横向器件结构，使用 GaN 工艺制造平台，通过合并漂移区和漏极以及双栅控制，即可实现单片集成的氮化镓双向器件 (Monolithic Bi-Directional Switch, MBDS)，从而有效降低芯片面积和成本。其电路图见下图所示：

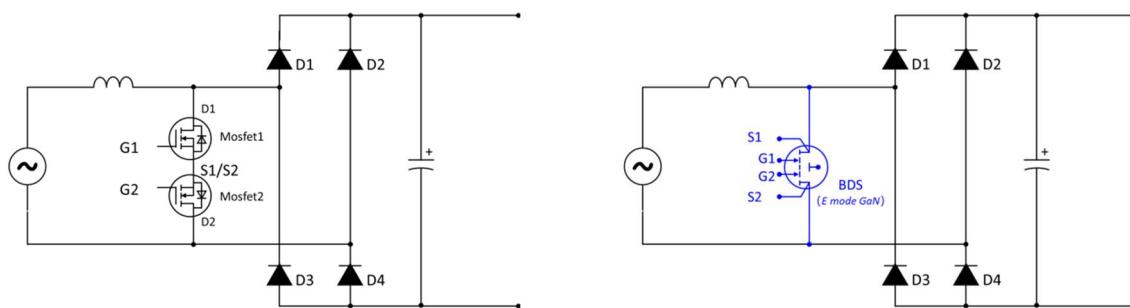


图 8 双向开关前置升压 APFC 采用 MOSFET 对管 (left) 和 GaN BDS (right) 的电路对比

### 4.2 双向开关前置升压 APFC 的工作过程

双向开关前置升压 APFC 电源主要包括储能电感、双向开关、整流桥和母线电容几部分。

- ① 当交流输入为正向半周时：
- a) 如果 BDS 导通，电流从 L 线经储能电感、双开关回到 N 线，此阶段为储能电感充电。此时的电路见下图：

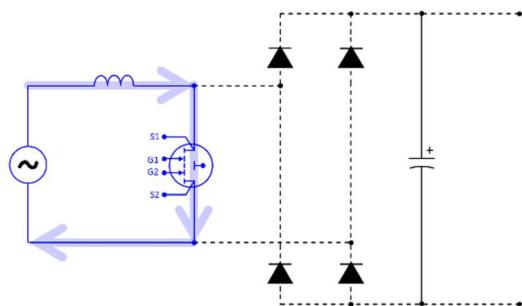


图 9 交流输入电压正半周时，BDS 导通

- b) 如果 BDS 关闭, 此时的等效电路为 Boost 拓扑, 储能电感和整流桥整流后的叠加电压输送到母线电容上, 实现升压。此时的电路见下图:

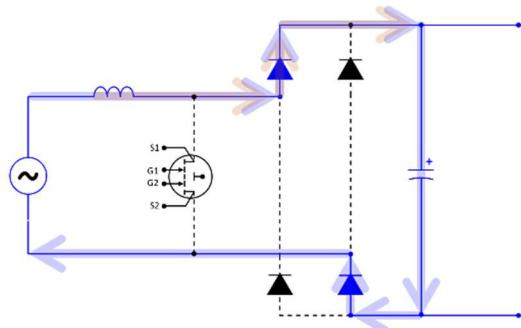


图 10 交流输入电压正半周时, BDS 关断后

② 当交流输入为负向半周时;

- a) 如果 BDS 导通, 电流从 N 线经双向开关、储能电感回到 L 线, 此阶段为储能电感充电。注意的是, 此时储能电感的电压方向和前一阶段相反。此时的电路见下图:

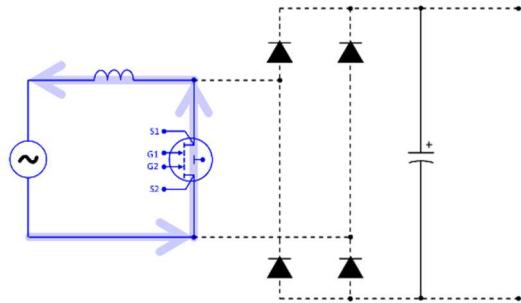


图 11 交流输入电压负半周时, BDS 导通

- b) 如果 BDS 关闭, 在负半周的等效电路也是 Boost 拓扑, 也实现了升压的目的。此时的电路见下图:

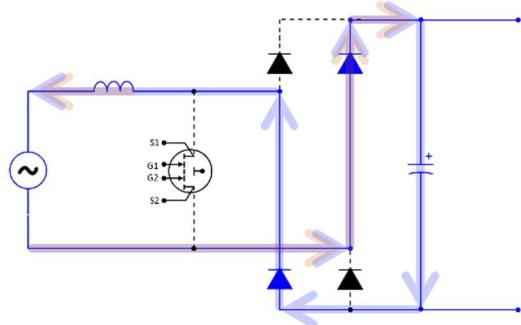


图 12 交流输入电压负半周时, BDS 关断后

双向开关 APFC 相对于 Boost 型 APFC 最显著的特点就是在整个工作周期内 BDS 存在明显的换流, 且二极管组成的两个桥臂也会有低频的工作切换。



### 4.3 双向开关前置升压 APFC 中 GaN BDS 和二极管的工作状态

通过仿真可以查看双向开关 BDS 和四个二极管的工作状态。

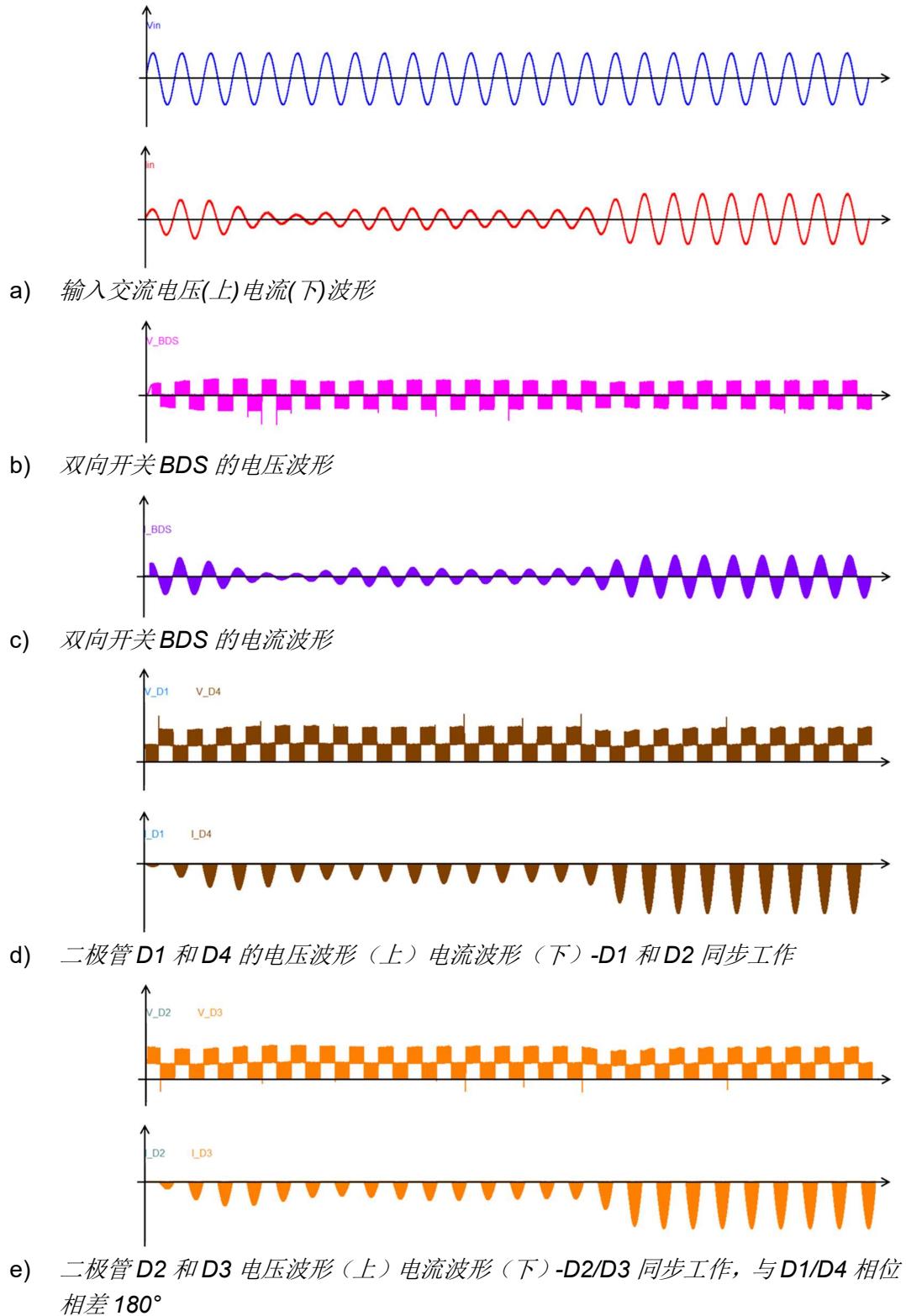


图 13 双开关管和四个整流二极管的电压和电流变化

根据以上的仿真结果可知，即在双向开关前置升压 APFC 中，并不存在和图腾柱无桥 APFC 一样严格的高频桥臂和低频桥臂。所有的四个二极管都工作在间歇式半周期低频截止和高频开关工作状态。

如果给一组二极管桥臂并联电容，则结果就完全不一样了。见下图：

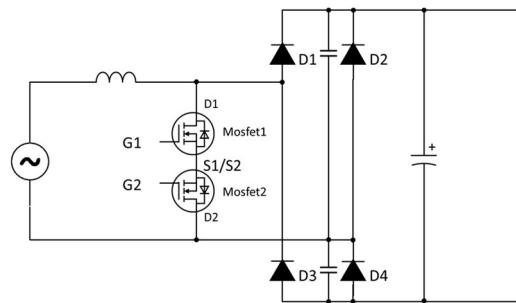
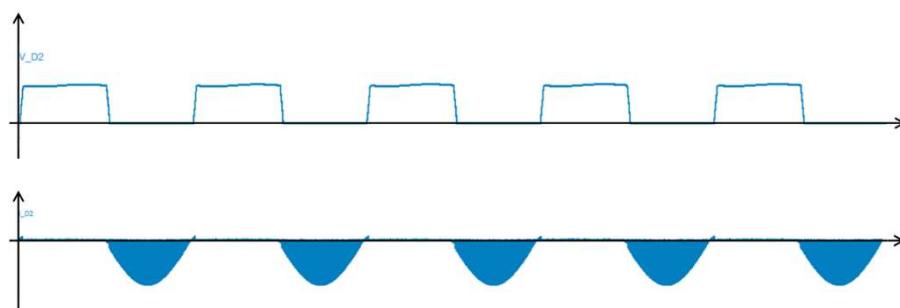


图 14 低频桥臂后的双向开关 APFC

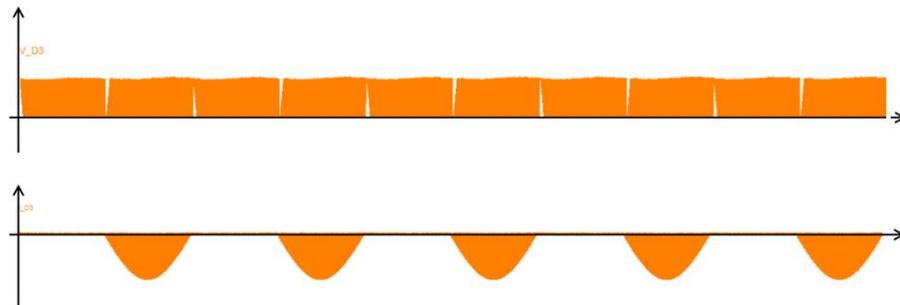
此时两个二极管桥臂的工作形态发生变化，见下图：



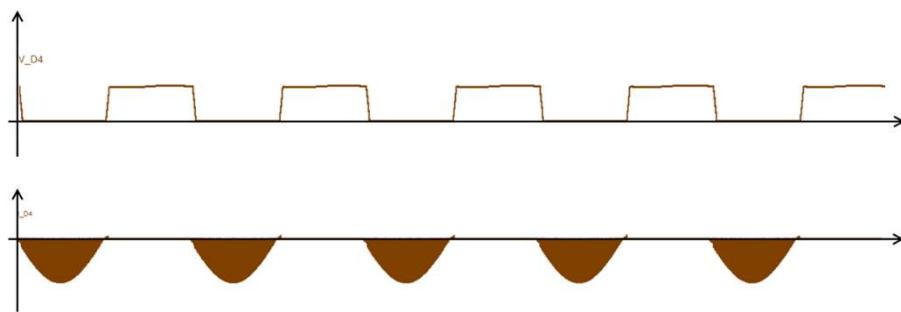
a) 二极管 D1 (高频桥臂) 的电压波形 (上) 和电流波形 (下)



b) 二极管 D2 (低频桥臂) 的电压波形 (上) 和电流波形 (下)



c) 二极管 D3 (高频桥臂) 的电压波形 (上) 和电流波形 (下)



d) 二极管 D4 (低频桥臂) 的电压波形 (上) 和电流波形 (下)

图 15 双向开关 APFC 高频桥臂和低频桥臂的工作状态

如上面的仿真结果所示，低频桥臂的损耗非常小，可以用普通硅二极管来设计，本评估板采用了整流桥，成本低廉。

#### 4.4 为什么采用 E-mode GaN BDS?

使用传统的 Si 或 SiC MOSFET，实现“双向阻断 + 双向导通”的功能，电源工程师需使用两个分立的“背靠背”开关器件串联形成，这就会导致串联后导通电阻翻倍，且多个封装体会占用更多的 PCB 面积。

得益于 GaN 的横向器件结构，使用 GaN 工艺制造平台，在无需工艺调整和 MASK 变动的前提下，通过合并漂移区和漏极以及双栅控制，即可以实现单片集成的氮化镓双向器件 (Monolithic Bi-Directional Switch, MBDS)，从而有效降低芯片面积和成本。GaN 的双向器件极具性能和成本优势 (相较于 Si/SiC 解决方案，系统具备更少的元件数量、更小的占板面积以及更有竞争力的系统成本)，但也存在关键技术问题需要解决：单片集成的 GaN-on-Si 双向器件在开关过程中，S1-S2 的电压  $V_{S1}-V_{S2}$  极性会交替变化，衬底电压需要进行控制来使之跟随最低的源极端口，避免因衬底感应电位导致的器件导通电阻变大问题。

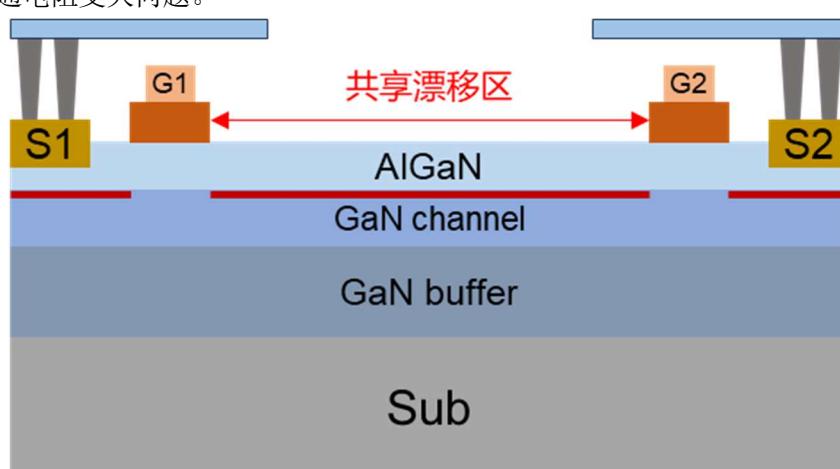


图 16 基于硅基氮化镓功率器件平台的双向器件结构

本评估板采用了云稼自主研发设计 GaN BDS 双向器件，产品型号 [CGK65090TBD](#)，是一款 650V 最大导通电阻 90mohm 的单片集成式双向器件。[CGK65090TBD](#) 内部集成了衬底电位控制

IC，在开关过程中能够将衬底电位切换到低压端，保证器件动态电阻稳定。同时 [CGK65090TBD](#) 采用了顶部散热的 TOLT (TO-Leaded Top-side Cooling) 封装形式以满足大功率应用需求。

评估板中 GaN BDS 器件 ([CGK65090TBD](#)) 及其驱动器和隔离供电电源所在的功率小板见下图所示：



图 17 GaN BDS 器件所在的功率小板（包括驱动和隔离电源）

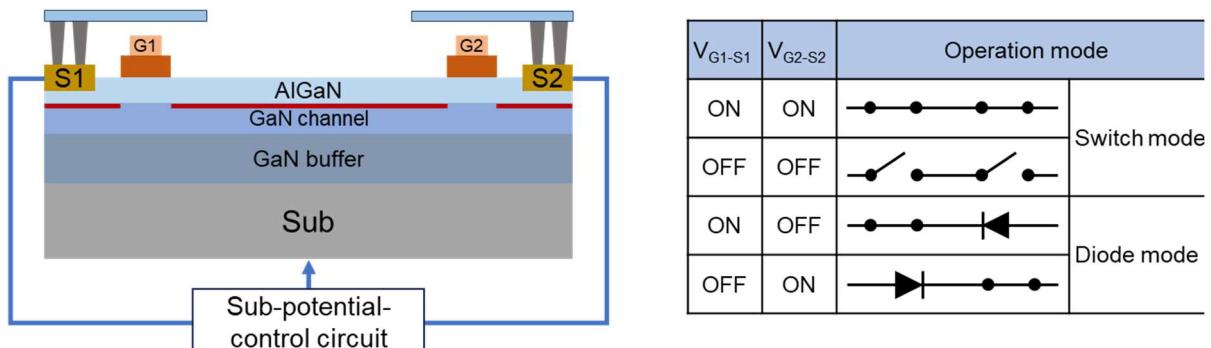


图 18 带有衬底电位控制电路的 GaN BDS 器件结构示意图（左）以及四象限工作模式（右）

如下图所示为 GaN BDS 的四象限静态 I-V 测试曲线，通过静态数据可以看出，GaN BDS 在沟道导通状态、二极管模式状态以及关态耐压模式均表现出对称性，体现出“双向导通，双向阻断”的双向器件特性。

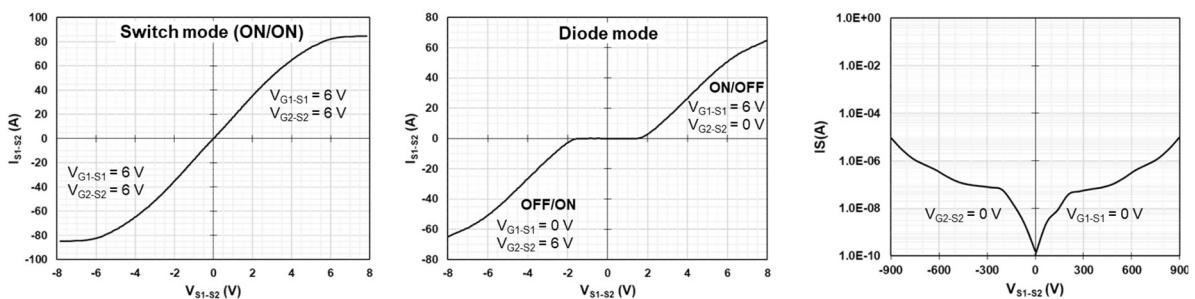


图 19 云稼 GaN BDS CKG65090TBD 的四象限 I-V 测试曲线



[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)



[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>

和传统的功率半导体的双脉冲测试不一样，双向开关 GaN(BDS)的双脉冲测试的关注重点在动态测试部分，如图 18(a) 所示的双脉冲测试电路对 [CGK65090TBD](#) 器件的动态特性进行表征，使用钳位电路可以提取器件在硬开关过程中的动态导通电阻。实验波形显示的测试条件是 400V/18A 硬开关工作，[CGK65090TBD](#) 动态电阻表现稳定，如图 18(b) 所示，第二个脉冲开启时刻，钳位电路稳出来的压降  $VM_{S2S1}$  与第一个脉冲的末尾时刻相同，说明双向器件的动态电阻在硬开关切换中几乎无退化，显示出衬底控制电路的有效性。

与之对比的是，在没有集成衬底控制电路的 GaN BDS 中，器件的动态电阻表现糟糕，如图 18(c) 所示，第二个脉冲开启时刻，钳位电路出来的压降  $VM_{S2S1}$  与第一个脉冲的末尾差异巨大，显示出衬底电位控制电路的重要性。

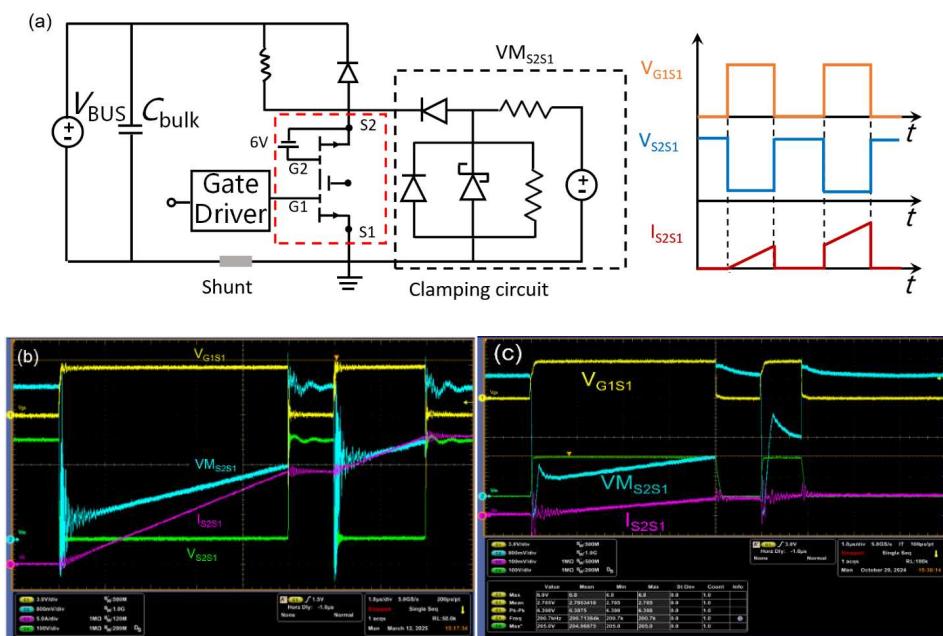


图 20 (a) 云稼用于双向器件动态电阻测试的双脉冲测试方案；(b) 云稼集成衬底电位控制电路的 GaN BDS CGK65090TBD 动态电阻双脉冲测试测试波形；(c) 没有集成衬底控制电路的 GaN BDS 动态电阻测试波形

## 5. CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的详细设计

### 5.1 双向开关前置升压 APFC 分析

对比两种拓扑结构，在工作过程中，双向开关前置升压 APFC 会减少一个整流二极管，因此在效率上会有所提升。

表 4：双向开关前置升压 APFC 和 Boost 型 APFC 拓扑和能耗差异对比表

正弦波	开关管状态	双向开关前置升压 APFC	Boost 型 APFC
正半周	ON	双向开关	开关管
	OFF	高频桥臂中续流二极管 x1 低频桥臂中整流二极管 x1	整流桥中整流二极管 x2 高频续流二极管 x1
负半周	ON	双向开关	开关管
	OFF	高频桥臂中续流二极管 x1 低频桥臂中整流二极管 x1	整流桥中整流二极管 x2 高频续流二极管 x1

表 5：双向开关前置升压 APFC 和 Boost 型 APFC 的 BOM 物料对比表

编号	器件名	双向开关前置升压 APFC	Boost 型 APFC
1	整流桥	X1 (低频二极管整流桥臂)	X1
2	交流电流采样	X1 (电流互感器)	None
3	直流电流采样	None	X1
4	跨接二极管	X1	
5	共模电感	X2	
6	继电器	X1	
7	储能电感	X1 或 X2 小电感	
8	开关器件	X1 (云稼 <a href="#">GCK65090TBD</a> )	X1, MOSFET、SiC 或 GaN 单管
9	驱动芯片	X1 (半桥隔离驱动芯片)	X1 非隔离驱动/控制芯片直驱
10	隔离供电	X2	None
11	高频二极管	X2 (高频二极管整流桥臂)	X1
12	母线电容	X1 (铝电解电容) 及 X4 (膜电容/MLCC)	



## 5.2 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的详细设计

下图为云稼半导体自己设计的双向开关前置升压 APFC 的电路图及 Layout:

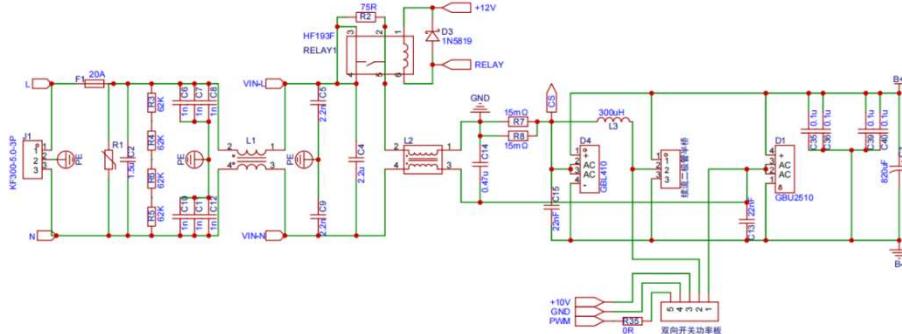


图 21 双向开关前置升压 APFC 主功率电路图

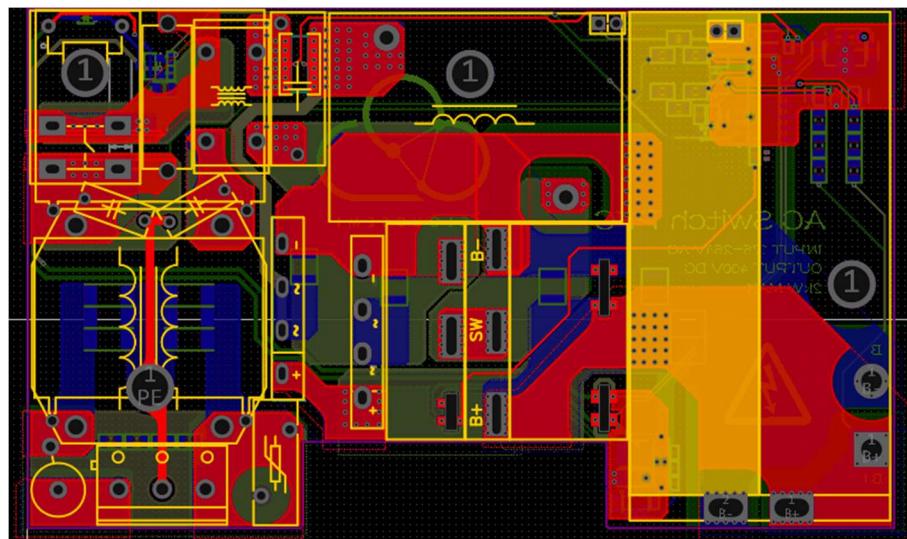


图 22 双向开关前置升压 APFC 主功率 Layout

下图为双向开关所在的功率小板的电路图及 Layout:

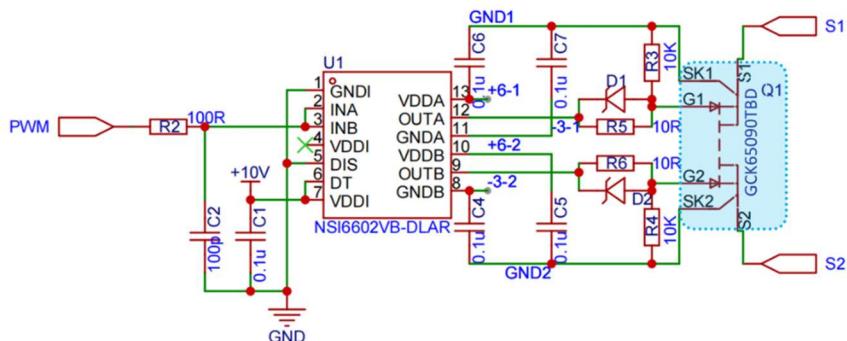


图 23 双向 GaN HEMT 器件 (BDS) 及其配套驱动电路

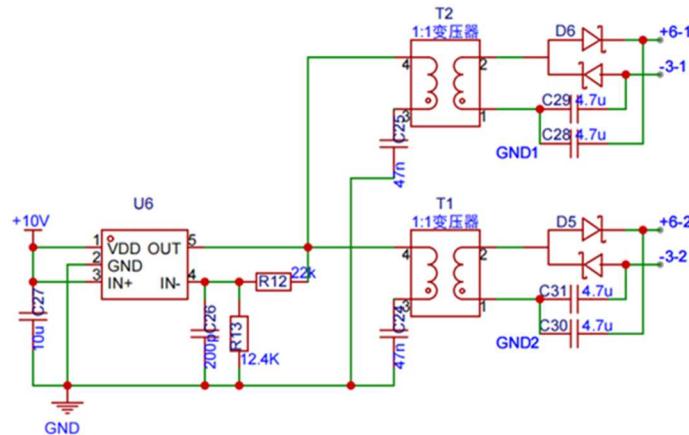


图 24 双向 GaN HEMT 器件 (BDS) 驱动的隔离供电电源

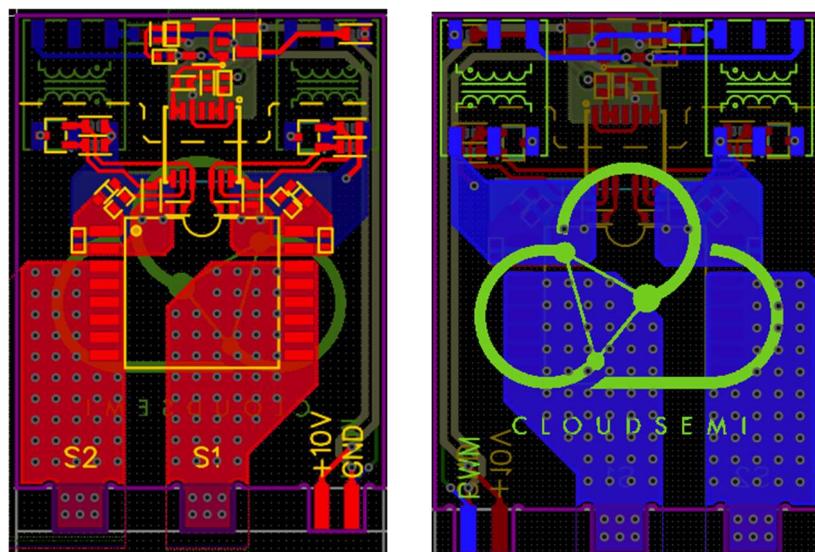


图 25 双向 GaN HEMT 器件 (BDS) 及其驱动电路所在的功率小板 Layout

### 5.3 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的测试结果

实验测试波形如下表所示：

#### 测试条件说明：

- 输入电压:  $V_{in} = 230VAC$
- 输入频率:  $f = 50Hz$
- 开关频率:  $f_{sw} = 65kHz$
- 输出电压:  $V_o = 400VDC$
- 输出功率:  $P_o = 2kW$
- 环境温度:  $T_a = 25^\circ C$

无外部其他辅助散热, DEMO 板无外壳, 满载工作半小时温度平衡后开始测试。

No.	名称	测试波形	备注
1	交流输入		
(1) 实测满载 APF≈0.995, THDI≈3% ;			
2	直流输出		
(2) 实测直流输出电压 395.8V, 粗估纹波电压率≈6%;			



[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)

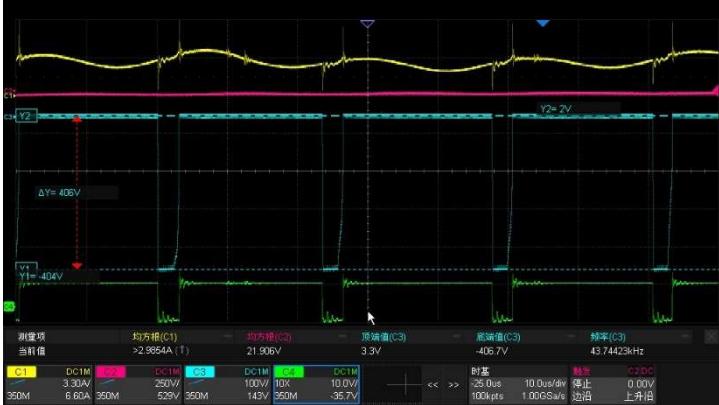
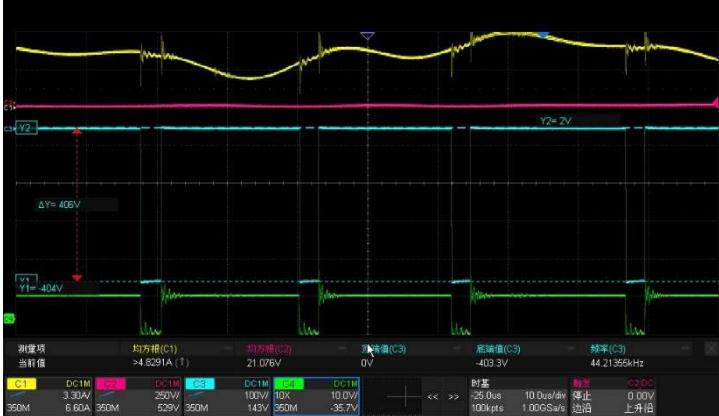


[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>

3	BDS 启机 波形测试		
4	启机时序 启机时间		
		<p>④ 上电至输出建立的时序，耗时 1.8s，启机瞬间的冲击电流也在可控范围内；</p>	
5	半载测试 V <sub>gs</sub> 应力		<p>⑤ 半载时 BDS 门极 V<sub>gs</sub> 应力测试（只记录了一路），无异常波形；</p>

6	半载测试 $V_{ds}$ 应力		
7	满载测试 $V_{gs}$ 应力		
8	满载测试 $V_{ds}$ 应力		

⑥ 半载时 BDS 的  $V_{ds}$  应力测试 (只记录了一路), 无异常波形;

⑦ 满载时 BDS 门极  $V_{gs}$  应力测试 (只记录了一路), 无异常波形;

⑧ 满载时 BDS 的  $V_{ds}$  应力测试 (只记录了一路), 无异常波形;



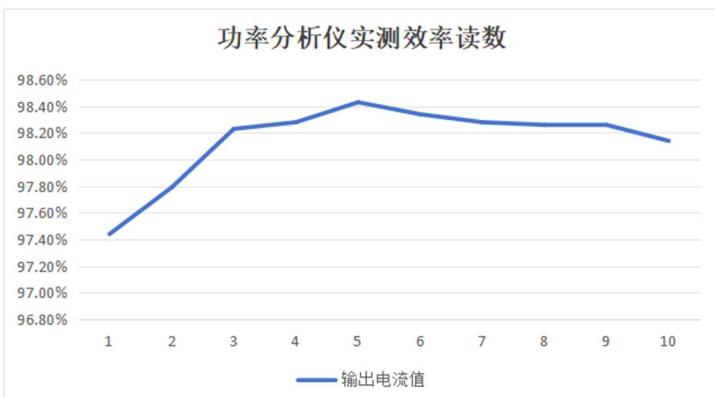
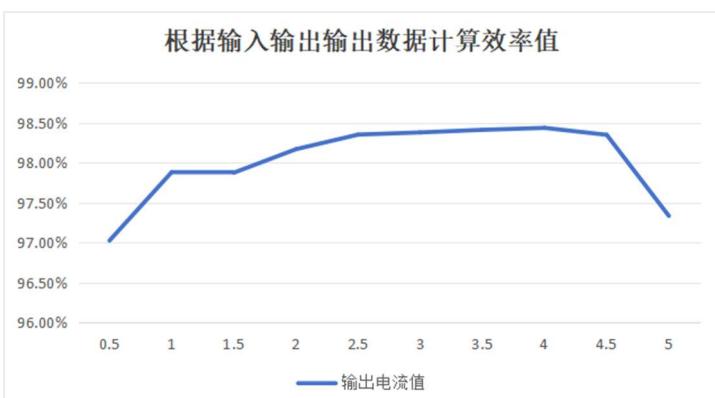
[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)



[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>

9	满载工作温度测试		
⑨ 室温情况下, 最高温度不到 75°C;			
10	效率曲线	 	
⑩ 最高效率超过 98.4%。整体效率均超过 97%;			
图 26、测试结果汇集			

## 附录：云稼双向开关器件 [CGK65090TBD](#)

此评估板采用的是云稼 BDS 系列的 [GCK65090TBD](#) 双向开关 GaN 器件，部分性能见下表所示：

表 6：

编号	名称	符号	数值	单位	备注
1	源源电压	$V_{SS, max}$	650	V	$V_{GS} = 0 \text{ V}$ ; $I_{SSS} = 10 \mu\text{A}$
2	源源通态阻抗	$R_{SS(on), max}$	90	$\text{m}\Omega$	$V_{G1S1} = 6 \text{ V}$ ; $V_{G2S2} = 6 \text{ V}$ ; $I_{S2} = 20 \text{ A}$ ; $T_j = 25^\circ\text{C}$
		$R_{S2S1(on), typ}$	140		$V_{G1S1} = 6 \text{ V}$ ; $V_{G2S2} = 6 \text{ V}$ ; $I_{S2} = 20 \text{ A}$ ; $T_j = 150^\circ\text{C}$
3	门极电荷	$Q_G$	13	nC	$V_{G1S1} = 0 \text{ to } 6 \text{ V}$ ; $V_{G2S2} = 6 \text{ V}$ ; $V_{S2S1} = 400 \text{ V}$ ; $I_{S2S1} = 20 \text{ A}$ or $V_{G2S2} = 0 \text{ to } 6 \text{ V}$ ; $V_{G1S1} = 6 \text{ V}$ ; $V_{S1S2} = 400 \text{ V}$ ; $I_{S1S2} = 20 \text{ A}$
4	门极电荷	$Q_{G1}$	11	nC	$V_{G1S1} = 0 \text{ to } 6 \text{ V}$ ; $V_G = V_{S2} = 400 \text{ V}$ ; $I_{S2S1} = 20 \text{ A}$ or $V_{G2S2} = 0 \text{ to } 6 \text{ V}$ ; $V_G = V_{S1} = 400 \text{ V}$ ; $I_{S1S2} = 20 \text{ A}$
5	源源持续电流	$I_{SS}$	20	A	$T_c = 25^\circ\text{C}$ ; $V_{GS} = 6 \text{ V}$
	源源脉冲电流	$I_{SS, Pulse}$	50		$T_c = 150^\circ\text{C}$ ; $V_{GS} = 6 \text{ V}$
			15		
6	输出电荷	$Q_{OSS @ 400 \text{ V}}$	80	nC	$V_{G1S1} = 0 \text{ V}$ ; $V_{G2S2} = 6 \text{ V}$ ; $V_{S2S1} = 400 \text{ V}$ ; $f = 1 \text{ MHz}$ or $V_{G2S2} = 0 \text{ V}$ ; $V_{G1S1} = 6 \text{ V}$ ; $V_{S1S2} = 400 \text{ V}$ ; $f = 1 \text{ MHz}$
7	输出电荷	$Q_{OSS1 @ 400 \text{ V}}$	65	nC	$V_{G1S1} = 0 \text{ V}$ ; $V_G = V_{S2} = 400 \text{ V}$ ; $f = 1 \text{ MHz}$ or $V_{G2S2} = 0 \text{ V}$ ; $V_G = V_{S1} = 400 \text{ V}$ ; $f = 1 \text{ MHz}$
8	反向恢复电荷	$Q_{rr}$	0	nC	

此器件采用了对称的 TOLT 封装，方便器件散热并满足瞬时功率的需求。

表 7：

编号	名称	图例说明	备注
1	封装说明 管脚说明		<p>① 双向 GaN 器件所用的 TOLT 封装和单向 GaN 器件略有差异； ② 后续有更多形式产品将推出。</p>



[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)



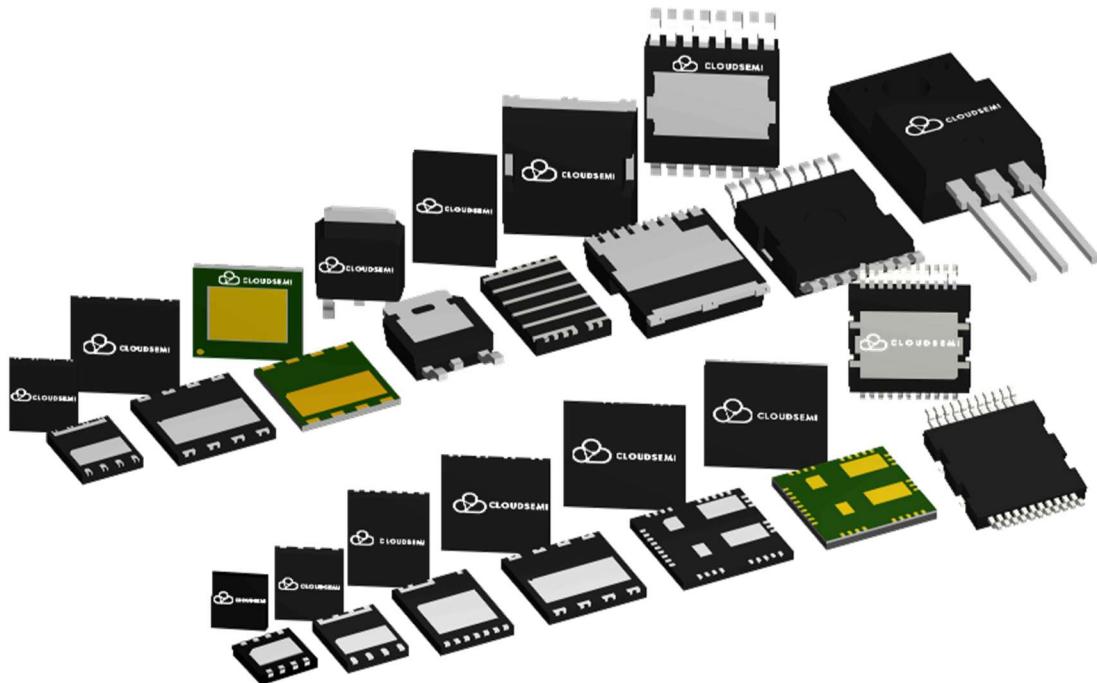
[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>



云稼半导体科技有限公司 (CloudSemi) 成立于 2021 年 11 月, 是一家专业从事 GaN 功率器件及解决方案的设计公司, 现有上海、常州、深圳三个研发及办事机构。公司核心团队具有多年 GaN 器件量产经验, 具备工艺开发、器件定制、IC 设计、封装测试、可靠性评估和系统应用等全建制能力, 可以提供定制化设计和全套解决方案服务, 帮助客户实现系统竞争力。目前, 公司已推出多款氮化镓功率器件及 IC 类产品, 应用场景可覆盖消费电子、数据中心、再生能源以及汽车电子等领域。



#### 公司现有三个研发及办事机构

- ★ 研发中心: 上海市浦东新区锦绣东路 2777 弄 3 号楼 602 室
- ★ RE 实验室: 常州市武进区常武中路 18-67 号常州科教城智能数字产业园 10#厂房 5 楼 503-1-1
- ★ 应用中心: 深圳市南山区沙河西路 3185 号南山智谷产业园 F 栋 404



更多信息请访问云稼官网: [www.cloudsemi.net](http://www.cloudsemi.net)  
或联系我们: [info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net).



[info@cloudsemi.net](mailto:info@cloudsemi.net)



[Public Evaluation Board Manual](#)



<http://www.cloudsemi.net>