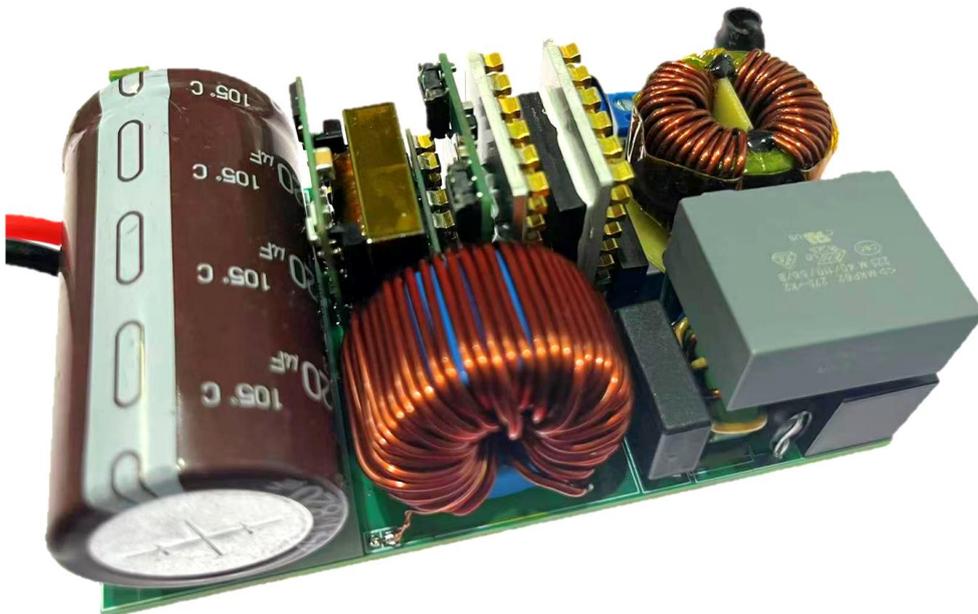


# 2kW High-Efficiency Bridge-less Boost PFC with GaN Bi-directional Switch (BDS)

## *Evaluation Board Manual*

### **CG-EVB-BDS-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 无桥 PFC

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

输出电压: 400 Vdc +/- 5 Vdc

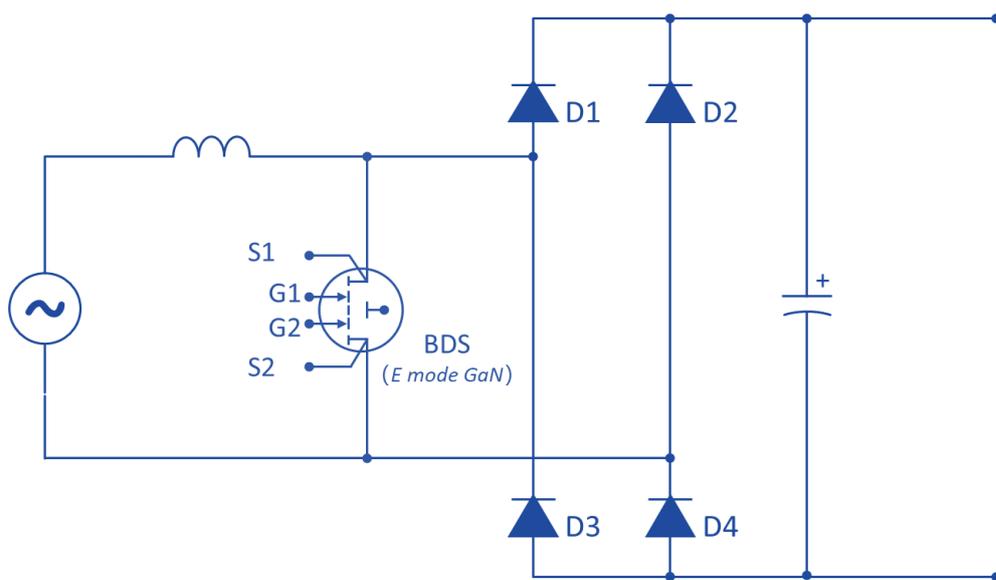
输出功率: 2000W

GaN 开关频率: 65 kHz

GaN 开关元件: CGK65090TBD

拓扑: 如下图所示

峰值效率: >98.5%



## 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 是云矽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、机械尺寸等信息。
- 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。

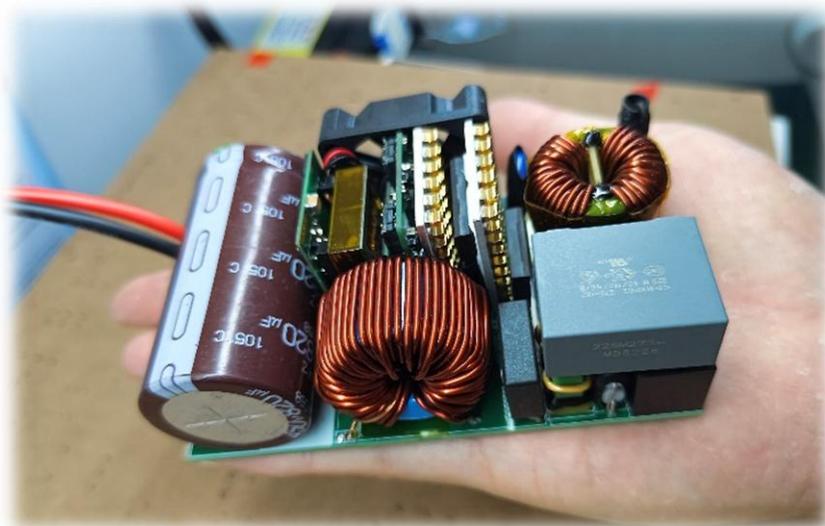


图 2 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的紧凑尺寸

## 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：

| 编号 | 名称        | 参数    | 单位  | 备注        |
|----|-----------|-------|-----|-----------|
| 1  | 输入典型电压    | 220   | Vac |           |
| 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   | Vdc |           |
| 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

| 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：

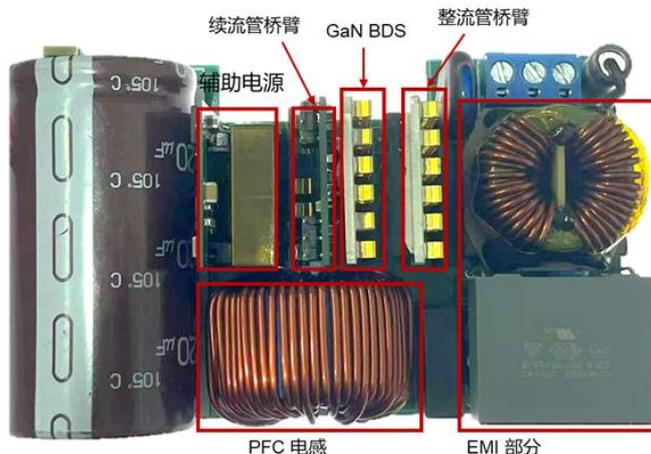


图 3 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 外形及其组成

CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板主要由以下几个主要部分组成：

|   |    |
|---|----|
| • 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（云矽 <a href="#">GCK65090TBD</a> ） | x1 |
| • 双向开关驱动芯片（半桥隔离驱动）                      | x1 |
| • 高频桥臂（SiC SBD）                         | x1 |
| • 低频桥臂（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：

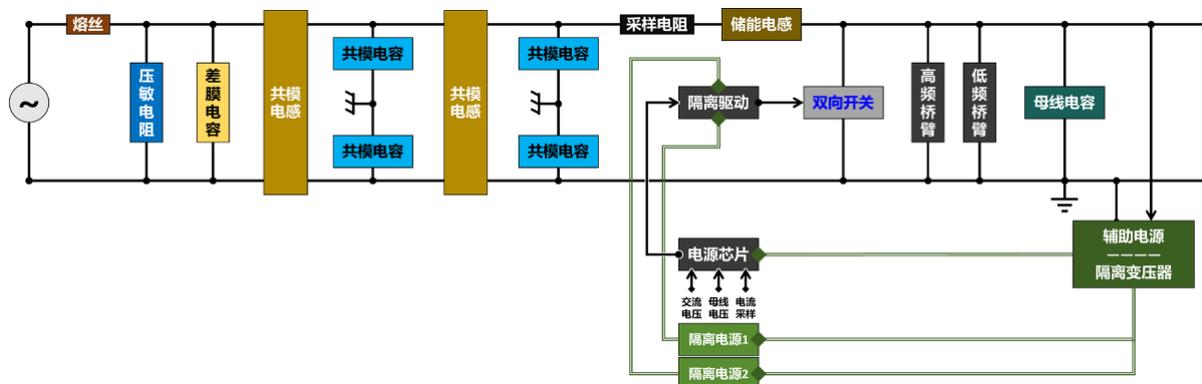


图 4 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板的电路结构框图

### 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 PFC 控制器 FAN6616，见下图：

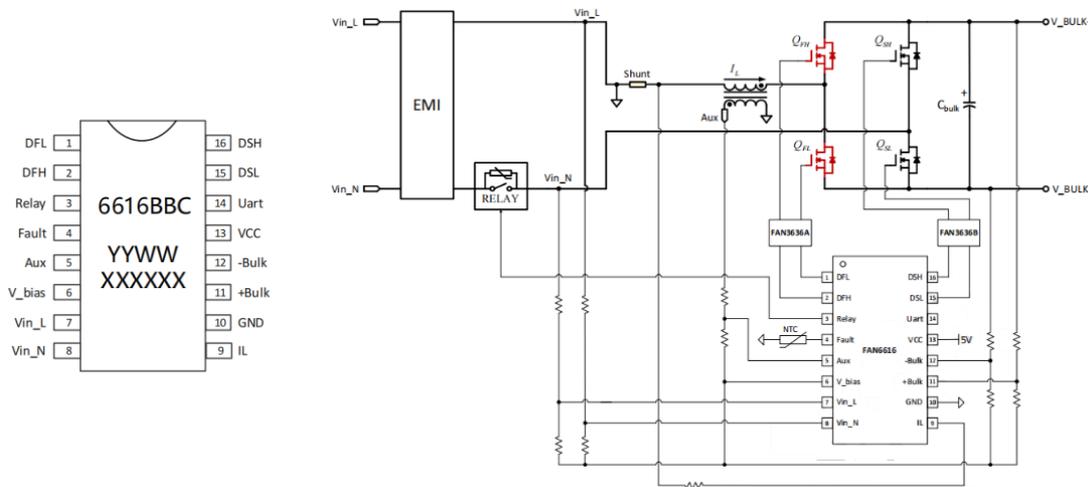


图 5 FAN6616 的 SOIC-16 管脚定义及推荐电路图

该控制芯片采用双环 APFC 控制原理，即在 APFC 电路里，电压环为外环，电流环为内环的双闭环控制，见下图所示：

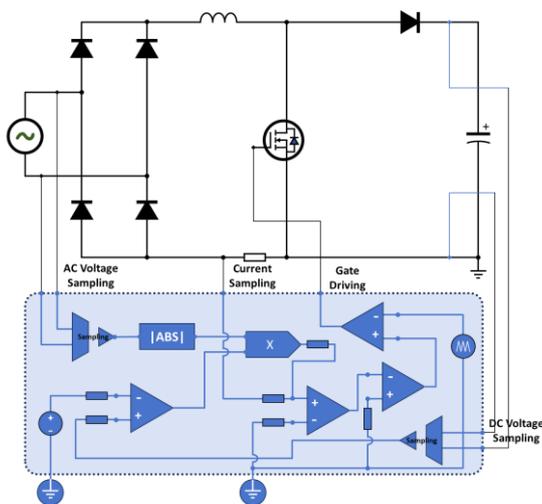
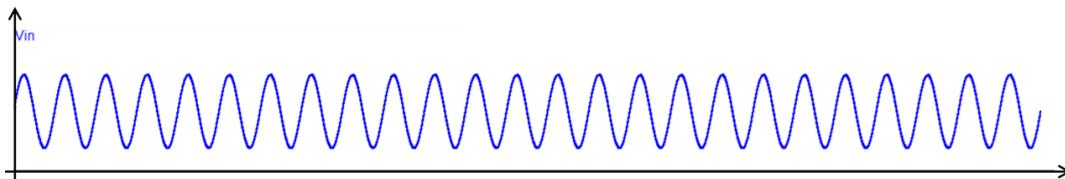


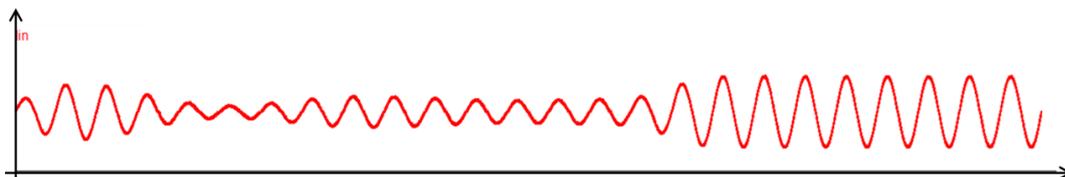
图 6 APFC 双环控制原理图

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对比，输出的模拟电压和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。

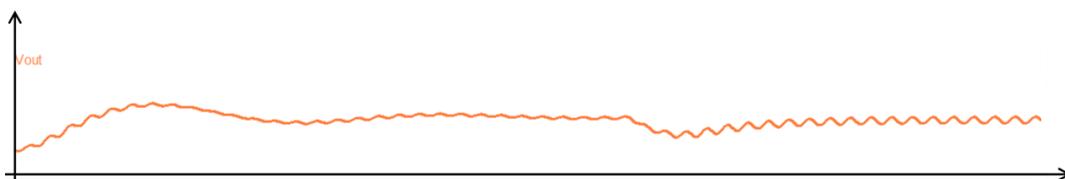
根据对 APFC 控制环路的认识，云镓半导体应用部搭建了仿真模型进行模拟，仿真结果见下图：



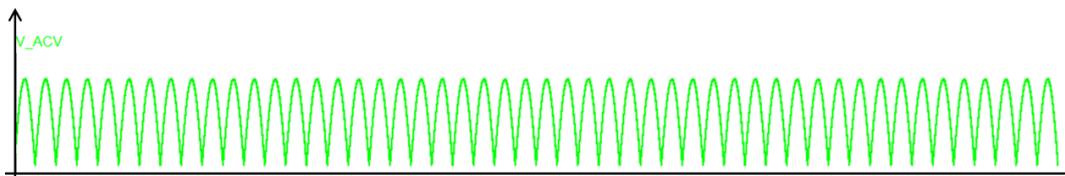
① 输入交流电压波形



② 输入电流矫正后的波形（为了验证闭环稳定性，期间加入了负载跳变）



③ 输出电压波形（为了验证闭环稳定性，期间加入了负载跳变，依旧能够稳定）



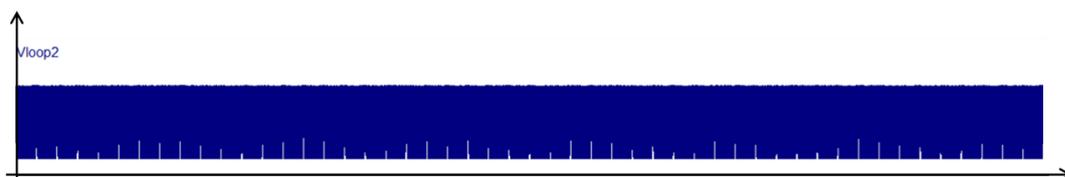
④ 交流电压采样后的波形



⑤ 母线直流电压采样后的波形（因负载跳变而引起的母线电压的自动调整）



⑥ 电压环的输出和电流环的输出的对比，纵向对称（负载跳变引起双环的相应变化）



⑦ 电压环和电流环经运算放大器对比后的输出

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:

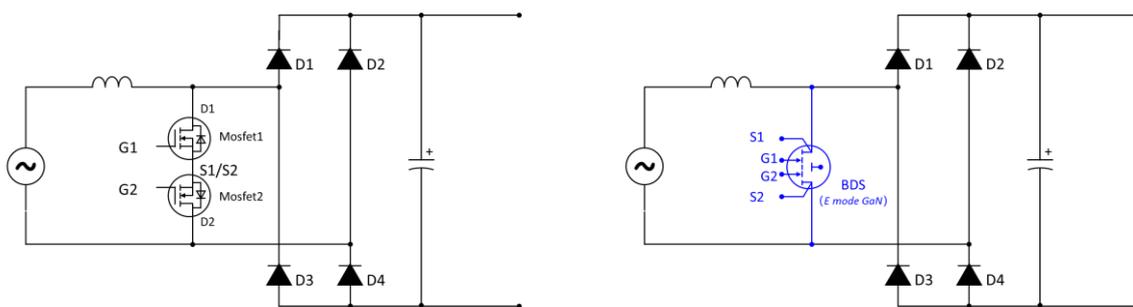


图 8 双向开关前置升压 APFC 采用 MOSFET 对管 (left) 和 GaN BDS (right) 的电路对比

### 4.2 双向开关前置升压 APFC 的工作过程

在此电路中, 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 双向开关导通, 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:

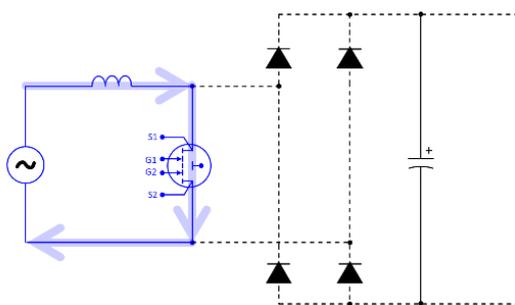


图 9.1 交流输入电压正半周时, BDS 导通

- 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:

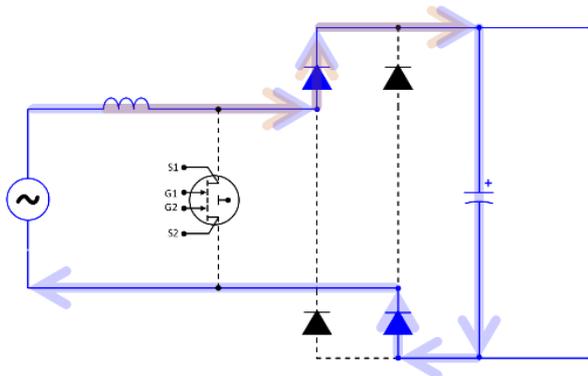


图 9.2 交流输入电压正半周时, BDS 关断后

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。电路如下:

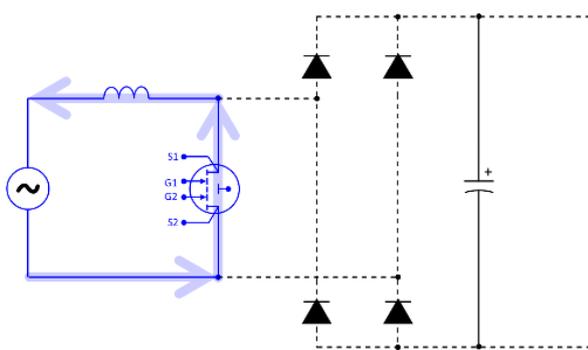


图 9.3 交流输入电压负半周时, BDS 导通

- 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:

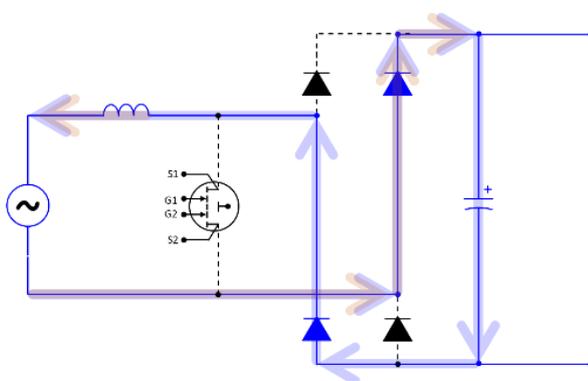


图 9.4 交流输入电压负半周时, BDS 关断后

### 4.3 双向开关前置升压 APFC 中功率器件的工作状态

通过仿真可以查看双向开关 BDS 和四个二极管的工作状态。

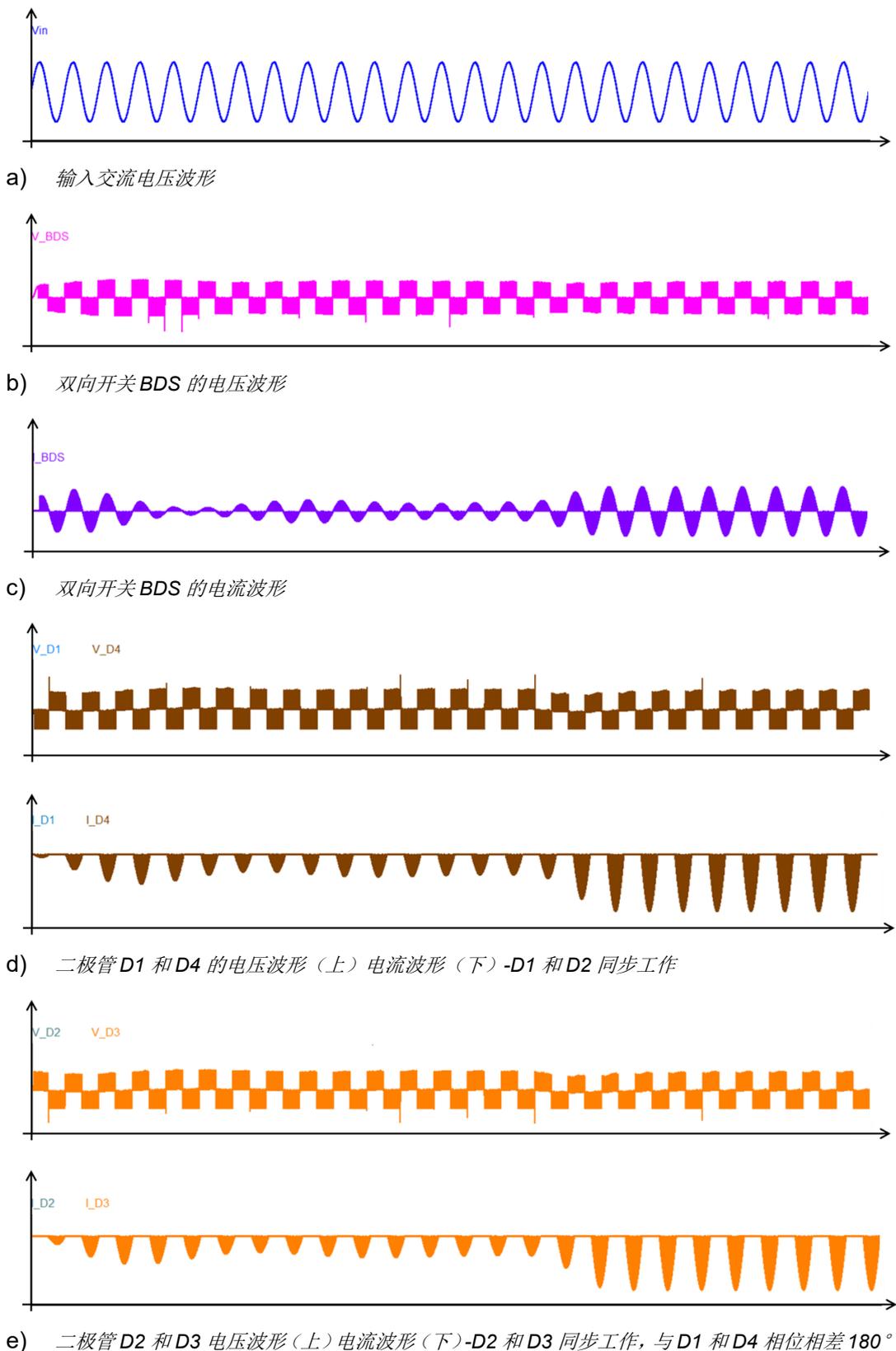


图 10 双开关管和四个整流二极管的电压和电流变化

根据以上的仿真结果可知，即在双向开关前置升压 APFC 中，并不存在所谓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高频工作和截止状态。

#### 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 VS1-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。

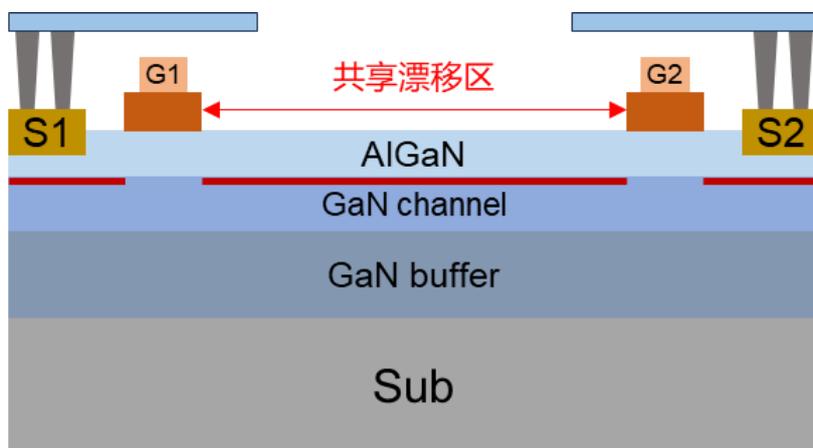


图 11 基于硅基氮化镓功率器件平台的双向器件结构

本评估板采用了云镓自主研发设计的 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。

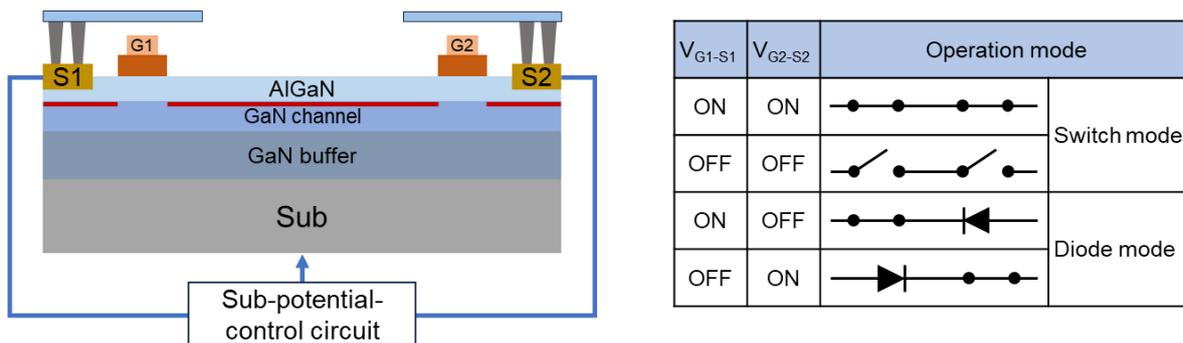


图 12 带有衬底电位控制电路的 GaN BDS 器件结构示意图（左）以及四象限工作模式（右）

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。

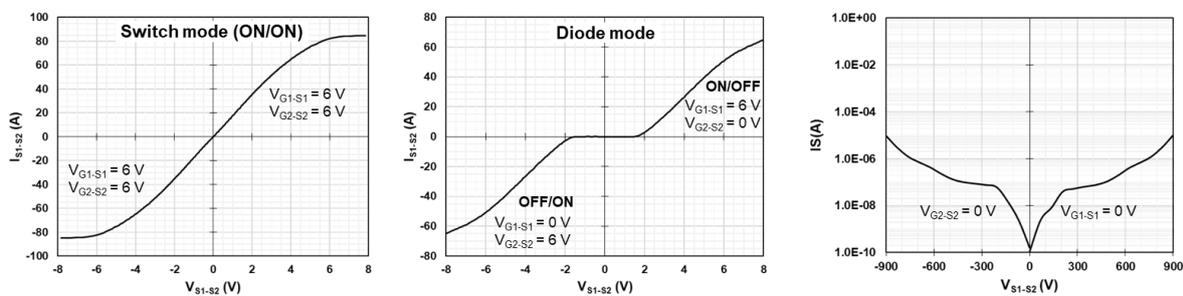


图 13 云矽 GaN BDS CKG65090TBD 的四象限 I-V 测试曲线

此外，在动态测试部分，使用双脉冲电路对 CGK65090TBD 器件的动态特性进行验证，在 400V/18A 硬开关下，CGC5011 动态电阻表现稳定，说明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 BDS 动态电阻在 10X 以上）。

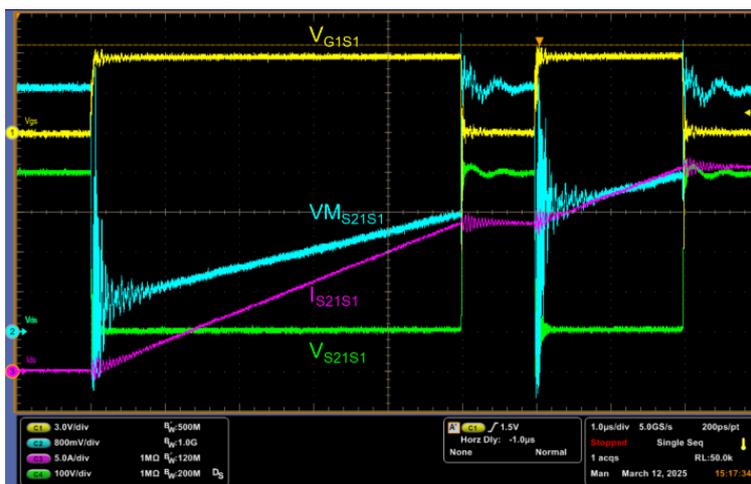


图 14 云矽 GaN BDS CKG65090TBD 动态电阻测试波形（双脉冲测试）

## 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，在功率器件数量上，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。

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<br>低频桥臂中整流二极管 x1 | 整流桥中整流二极管 x2<br>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<br>低频桥臂中整流二极管 x1 | 整流桥中整流二极管 x2<br>高频续流二极管 x1 |

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    | None                                 | X1                      |
| 2  | 交流电流采样 | X1 (电流互感器)                           | None                    |
| 3  | 跨接二极管  | X1                                   |                         |
| 4  | 共模电感   | X2                                   |                         |
| 5  | 继电器    | X1                                   |                         |
| 6  | 储能电感   | X1 或 X2 小电感                          |                         |
| 7  | 开关器件   | X1 (云矽 <a href="#">GCK65090TBD</a> ) | X1, MOSFET、SiC 或 GaN 单管 |
| 8  | 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         |
| 9  | 隔离供电   | X2                                   | None                    |
| 10 | 高频二极管  | X4                                   | X1                      |
| 11 | 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

下图为云矽半导体自己设计的双向开关前置升压 APFC 的电路图：

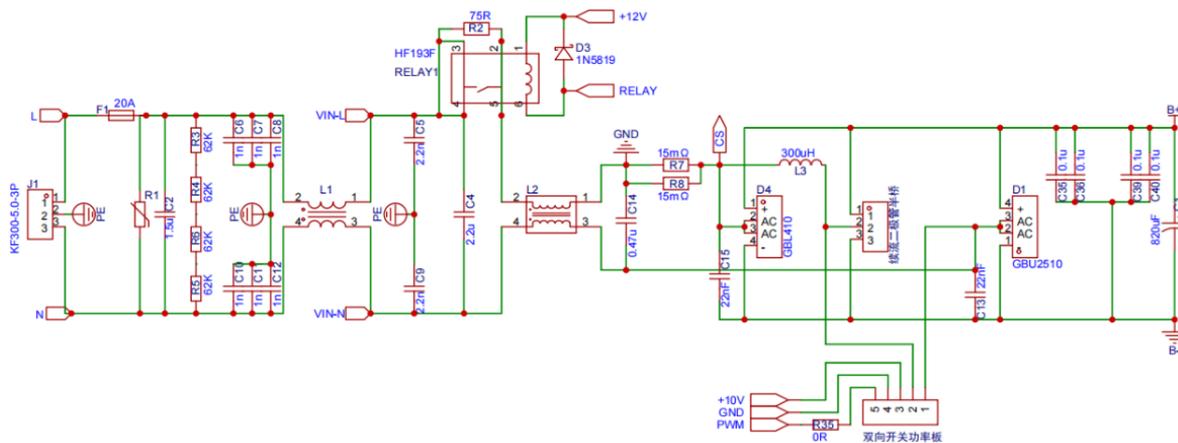


图 15.1 双向开关前置升压 APFC 主功率电路图

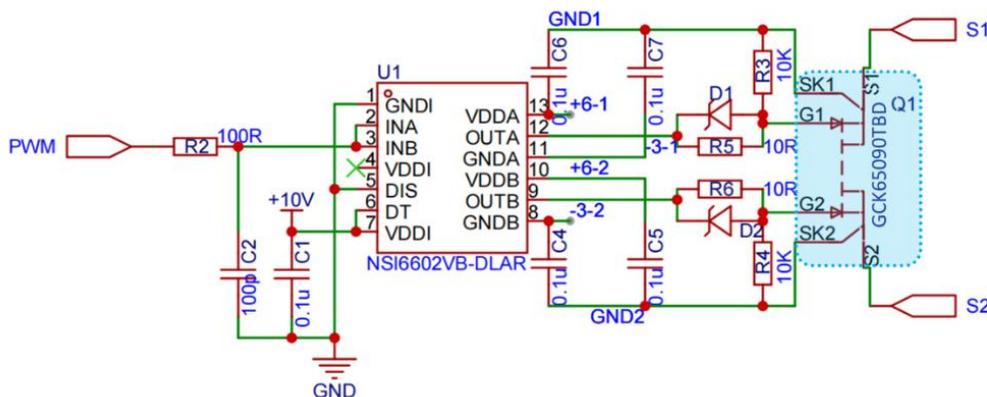


图 15.2 双向 GaN HEMT 器件 (BDS) 及其配套驱动电路

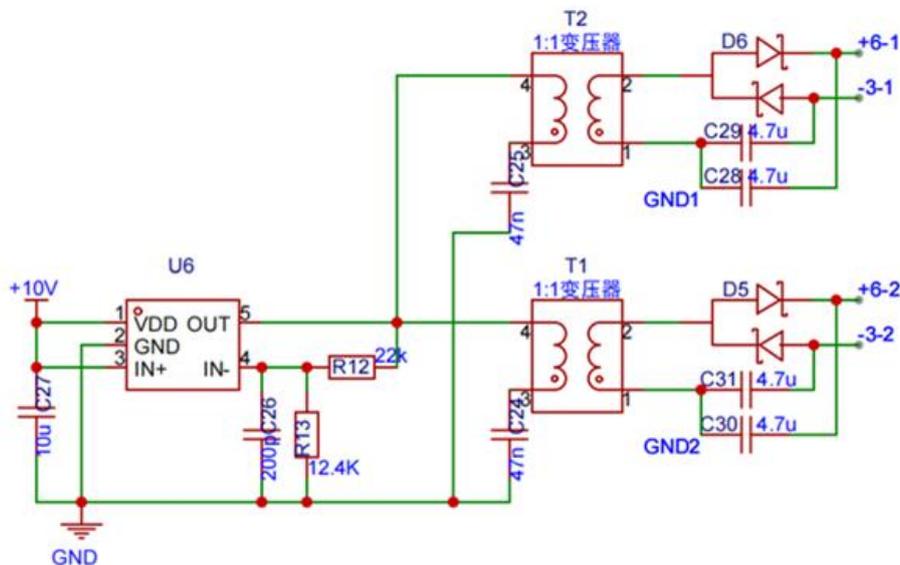


图 15.3 双向 GaN HEMT 器件 (BDS) 驱动的隔离供电电源

### 5.3 CG-EVB-BDS-PFC-2KW 评估板测试波形

实验测试波形如下表所示：

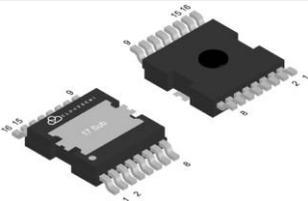
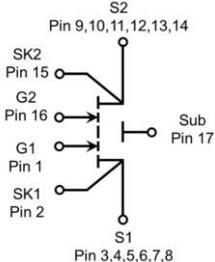
| 编号 | 名称   | 测试波形   | 备注  |
|----|------|--|---|
| 1  | 交流输入 |  | <p>测试条件如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 输入电压 <math>V_{in} = 230VAC</math></li> <li>• 输入频率 <math>f = 50Hz</math></li> <li>• 开关频率 <math>f_{sw} = 65kHz</math></li> <li>• 输出电压 <math>V_o = 400VDC</math></li> <li>• 输出功率 <math>P_o = 2kW</math></li> <li>• 环境温度 <math>T_a = 25^{\circ}C</math></li> </ul> <p>无外部其他辅助散热，DEMO 无外壳，满载工作半小时后开始测试</p> |
|    |      | <p>实测 APF<math>\approx</math>0.995, THDi<math>\approx</math>3%</p> |   |
| 2  | 直流输出 |  |   |
|    |      | <p>实测直流输出电压 395.8V，粗估纹波电压率<math>\sim</math>6%。</p>                 |   |
| 3  | 温度测试 |  |   |
|    |      | <p>最高温度不到 75<math>^{\circ}C</math></p>                             |   |

## 附录:

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

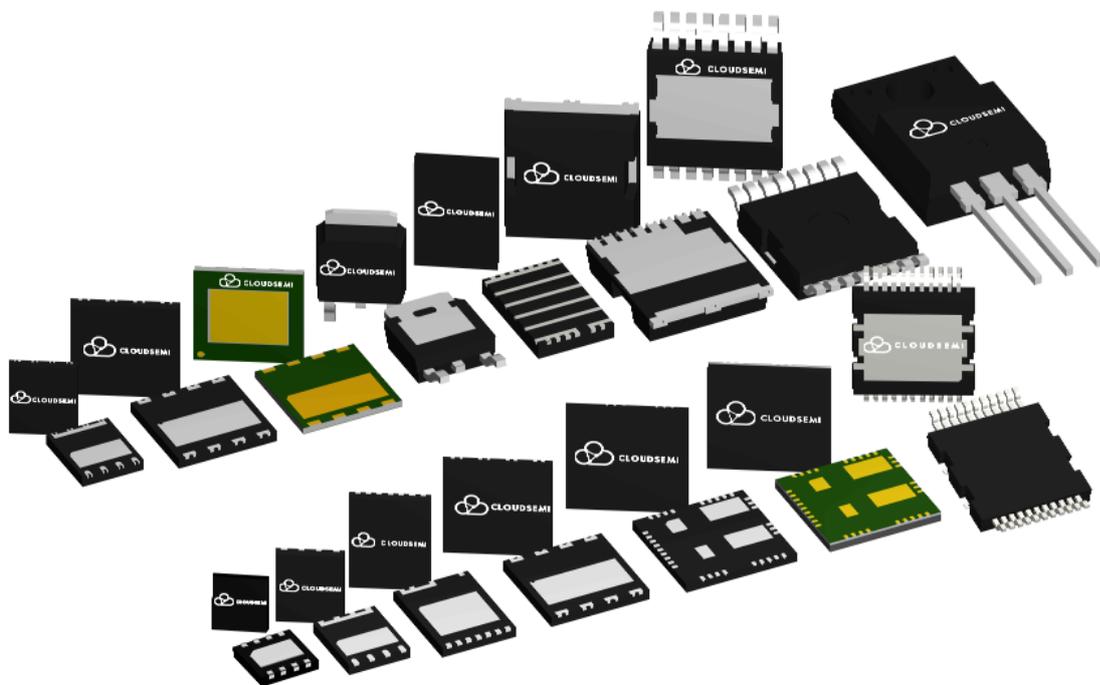
| 编号 | 名称     | 符号                  | 数值       | 单位         | 备注  |
|----|--------|---------------------|----------|------------|---|
| 1  | 源源电压   | $V_{SS, max}$       | 650      | V          | $V_{GS} = 0 V; I_{SS} = 10 \mu A$   |
| 2  | 源源通态阻抗 | $R_{SS(on), max}$   | 90       | m $\Omega$ | $V_{G1S1} = 6 V; V_{G2S2} = 6 V; I_{S2} = 20 A; T_j = 25^\circ C$   |
|    |        | $R_{S2S1(on), typ}$ | 140      |            | $V_{G1S1} = 6 V; V_{G2S2} = 6 V; I_{S2} = 20 A; T_j = 150^\circ C$  |
| 3  | 门极电荷   | $Q_G$               | 13       | nC         | $V_{G1S1} = 0 \text{ to } 6 V; V_{G2S2} = 6 V; V_{S2S1} = 400 V;$<br>$I_{S2S1} = 20 A$ or<br>$V_{G2S2} = 0 \text{ to } 6 V; V_{G1S1} = 6 V; V_{S1S2} = 400 V;$<br>$I_{S1S2} = 20 A$ |
| 4  | 门极电荷   | $Q_{G1}$            | 11       | nC         | $V_{G1S1} = 0 \text{ to } 6 V; V_{G2} = V_{S2} = 400 V;$<br>$I_{S2S1} = 20 A$ or $V_{G2S2} = 0 \text{ to } 6 V; V_{G1} = V_{S1} = 400 V; I_{S1S2} = 20 A$                           |
| 5  | 源源持续电流 | $I_{SS}$            | 20       | A          | $T_c = 25^\circ C; V_{GS} = 6 V$  |
|    | 源源脉冲电流 | $I_{SS, Pulse}$     | 50<br>15 |            | $T_c = 150^\circ C; V_{GS} = 6 V$   |
| 6  | 输出电荷   | $Q_{OSS @ 400 V}$   | 80       | nC         | $V_{G1S1} = 0 V; V_{G2S2} = 6 V; V_{S2S1} = 400 V;$<br>$f = 1 \text{ MHz}$ or<br>$V_{G2S2} = 0 V; V_{G1S1} = 6 V; V_{S1S2} = 400 V;$<br>$f = 1 \text{ MHz}$                         |
| 7  | 输出电荷   | $Q_{OSS1 @ 400 V}$  | 65       | nC         | $V_{G1S1} = 0 V; V_{G2} = V_{S2} = 400 V; f = 1 \text{ MHz}$<br>or $V_{G2S2} = 0 V; V_{G1} = V_{S1} = 400 V; f = 1 \text{ MHz}$   |
| 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。

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



云镓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



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