

4.5kW High-Efficiency Half-Bridge LLC Resonant Converter with CloudSemi E-mode GaN

Evaluation Board Manual

CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW



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.



基于云矽 E-mode GaN 器件 4.5kW 高效率 高功率密度 对称半桥 LLC 谐振变换器评估板

输入电压: 400Vdc \pm 10Vdc

输出电压: 53.5 Vdc \pm 0.5 Vdc

输出功率: 4500W (Typ)

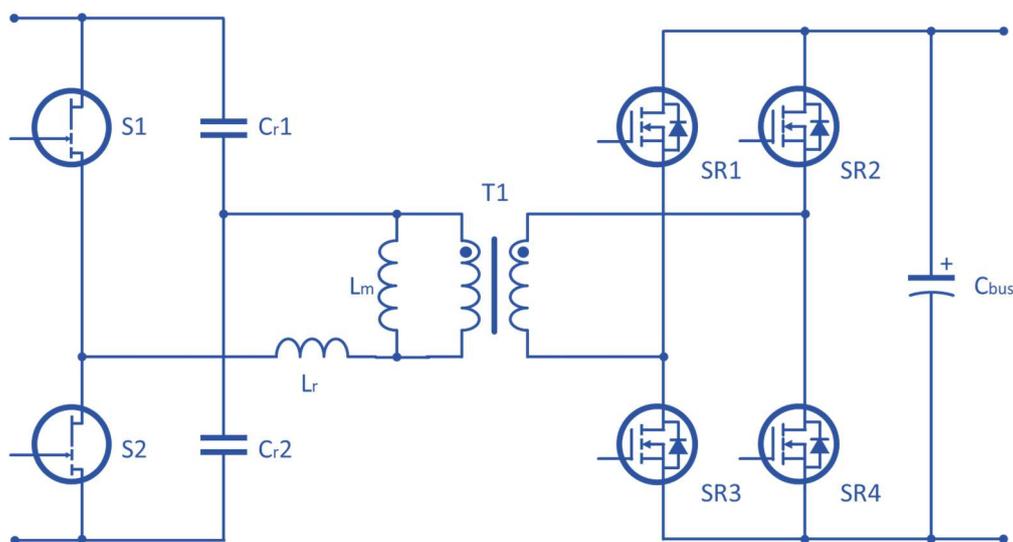
GaN 开关频率: 55k~100kHz

GaN 开关元件: CG65030TBD

峰值效率: >99%

尺寸(长 x 宽 x 高): 210mm x 58.5mm x 37mm

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 在 LLC 谐振变换器原边桥臂电路的应用.....	9
4.1 LLC 谐振变换器简介.....	9
4.2 LLC 谐振变换器的工作过程.....	9
4.3 对称半桥 LLC 谐振变换器中原副边开关管的电流工作状态.....	11
4.4 为什么采用 E-mode GaN?	12
5. CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的详细设计.....	14
5.1 对称半桥 LLC 谐振变换器分析.....	14
5.2 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的详细设计.....	14
5.3 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的测试结果.....	16
附录：云矽 E-mode GaN 开关器件 CG65030TBD.....	20



对称半桥 LLC 谐振变换器评估板 (CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW)

1. 介绍

CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 对称半桥 LLC 谐振转换器是云矽半导体专门为国内的数据中心、通讯电源、电动车充电机、工业电源、矿机电源、电机驱动等应用领域开发的一块评估板 (DEMO)。



图 1 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板外形

- 本说明概括了 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 的主要特性、关键数据等信息。
- 本评估板支持客户在应用对称半桥 LLC 谐振转换器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-SHB-LLC-4.5KW 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。

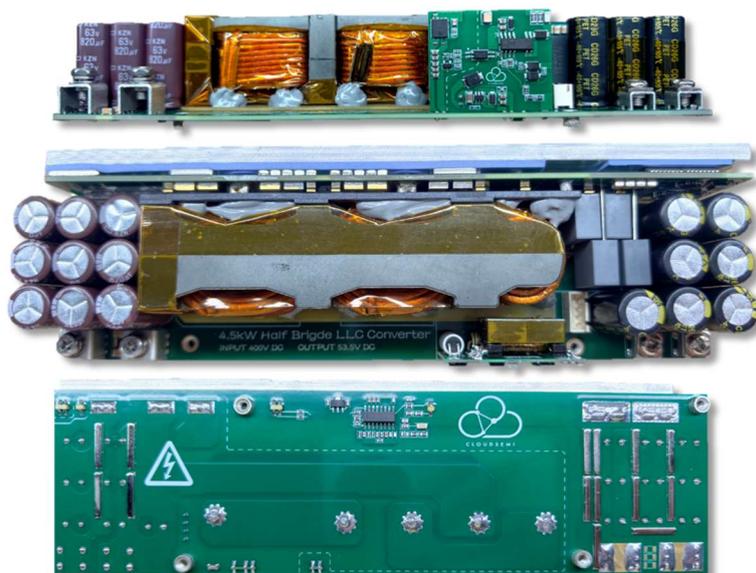


图 2 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的三视图

2. 评估板的主要特点

2.1 基本电气性能

该评估板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	400	Vdc	±10V
2	输出典型电压	53.5	Vdc	±0.5V
3	输出电压纹波	≤25	V	峰峰值@满载
4	输出典型功率	4.5	kW	
5	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	11.6	A	-
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-SHB-LLC-4.5KW 外形及其组成

CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板主要由以下几个主要部分组成：

表 3:

• 原边侧输入母线铝电解电容	x7
• 原边侧母线电容(MLCC)	x4
• 原边电流互感器	x1
• 原边功率半桥的 E-mode GaN(CG65030TBD)	x4
• 原边功率半桥 GaN 的驱动芯片	X2
• 原边电容半桥的谐振电容	x4
• 变压器及谐振电感一体磁集成	x1
• 副边侧同步整流 MOSFET	X16
• 副边侧整流二极管(轻载整流)	x8
• 副边侧同步整流驱动芯片	x4
• LLC 电源管理芯片	x1
• LDO	x1
• 辅助电源	x1
• 输出侧铝电解电容	x9
• 输出侧电容 (MLCC)	X2

2.4 评估板电路结构

此对称半桥 LLC 谐振变换器的电路结构框图如下图所示：

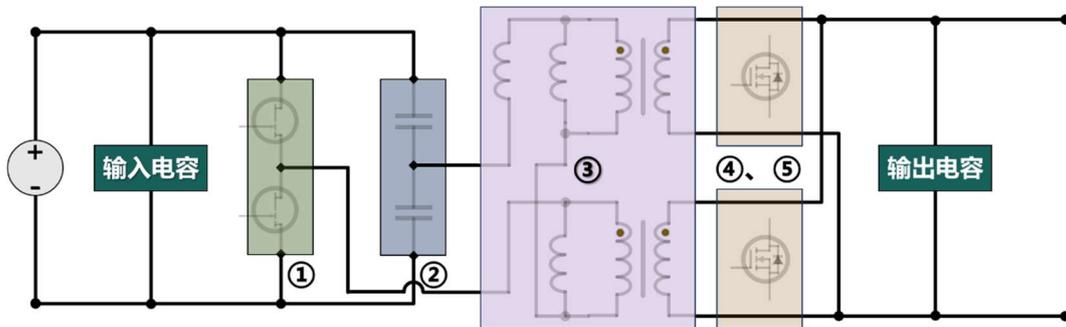


图 4 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的电路结构框图

- ① GaN 所在的功率半桥；
- ② 电容半桥；
- ③ 谐振电感与变压器的一体磁集成
- ④ 与⑤都是多个 Si MOSFET 并联组成的同步整流桥

3. 评估板的控制原理

CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板采用 Onsemi 公司的 LLC 谐振转换器控制器（含同步整流控制）NCP4390，见下图：

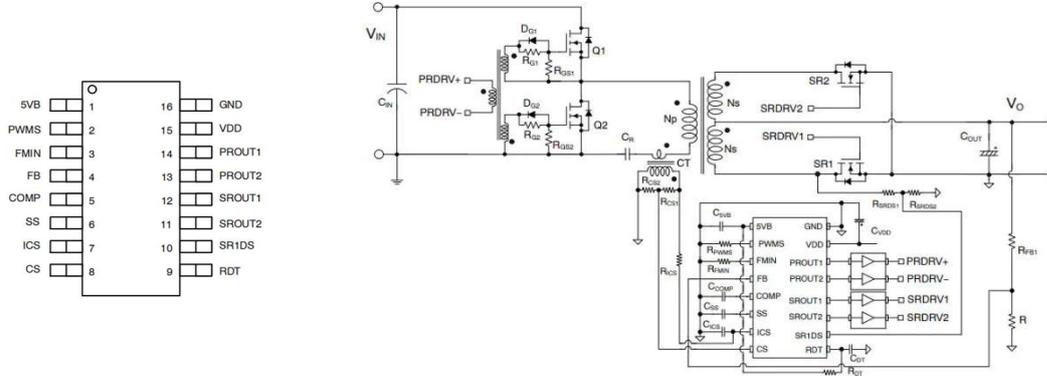


图 5 NCP4390 的 SOIC-16 管脚定义及推荐电路图

该控制器采用了电流模式控制和同步整流控制，有效地提高了整机效率，其控制原理见下图所示：

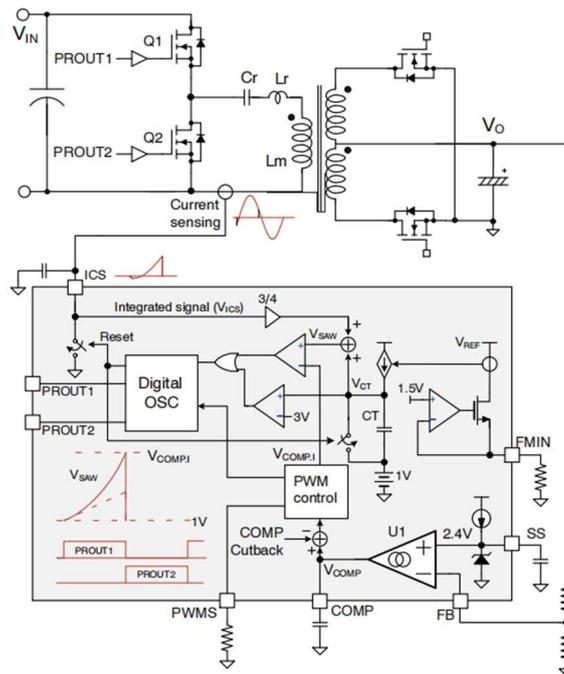


图 6 NCP4390 的控制原理图

电流型控制在电压反馈环的基础上增加电流反馈环，形成双环控制。它通过检测谐振电流（如峰值电流或平均电流），将实际电流与参考电流比较，生成误差信号，进而调整开关频率或占空比。电流环快速响应电流变化，电压环负责稳定输出电压，两者协同工作。

相比而言，电压型控制的响应速度较慢，因电压反馈环路存在滞后，需等待输出电压变化后才调整，对负载突变或输入电压变化的响应延迟较长。如果发生负载切换在原边侧的谐振腔可能存在较大的电流过冲应力。而电流型控制的动态响应快，电流环能直接感知电流变化，快速调整开关频率或占空比，有效抑制电压波动。

对比 E-mode GaN HEMT 和 SJ MOS 在电流控制型 LLC 谐振变换器过流保护保护时的性能：

- SJ MOS: 开关速度相对较慢，过流响应时间较长，可能导致过流期间能量积累较多，增加器件损坏风险。
- E-mode GaN HEMT 开关速度极快（开通和关闭时间仅为硅材料的 1/5 左右），能更快地检测和响应过流事件，减少过流持续时间，降低器件应力；



图 7 SJ MOS 电流控制型 LLC 过流保护
波形



图 8 4.5kW 评估板 E-mode GaN HEMT 的过流保
护测试波形

CHN1: 谐振腔电流波形

CHN2: 原边功率半桥下管 S1 的驱动 PWM 波形

CHN3: 原边功率半桥上管 S2 的驱动 PWM 波形

从上图来看， GaN 在过流保护的响应速度、精度、损耗控制和可靠性方面更具优势，尤其适合高频、高功率密度的 LLC 应用；SJ MOS 则还需通过优化电路设计和保护策略来提升过流保护性能。

4. E-mode GaN 在 LLC 谐振变换器原边桥臂电路的应用

4.1 LLC 谐振变换器简介

LLC 谐振变换器是一种高性能的开关电源拓扑结构，广泛应用于需要高效率、高功率密度和低电磁干扰的场景。

LLC 谐振变换器主要由以下几部分组成：

- 功率器件组成的半桥或全桥式开关电路：本文为 S1、S2 的 E-mode GaN 组成的半桥；
- 谐振腔：包括谐振电感 (L_r)、谐振电容 (C_{r1} 和 C_{r2}) 和变压器的励磁电感 (L_m)；
- 功率变压器：见图中的 T1；
- 整流电路：本电路中采用了 MOSFET 同步整流方案，如图所示 SR1、SR2、SR3 和 SR4。
- 输入和输出电容

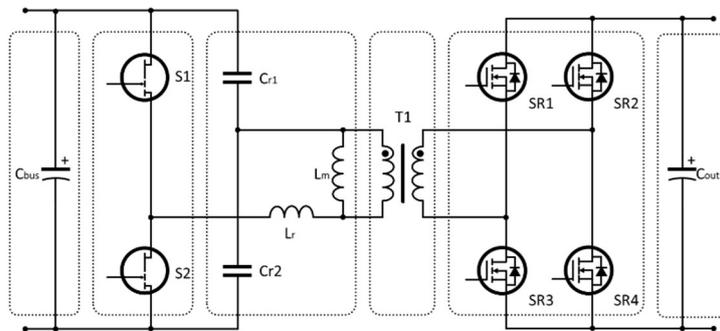


图 9 LLC 谐振变换器的主要组成部分

4.2 LLC 谐振变换器的工作过程

对称半桥 LLC 谐振变换器的工作过程如下面分析。

① 当原边侧功率半桥上管 S1 导通，下管 S2 截止时；

- a) Busbar 母线电流经 S1→谐振电感→变压器→谐振电容 C_{r2} 回到 Busbar 地。与此同时，电容 C_{r1} 放电、 C_{r2} 充电，前者电压下降，后者电压上升。

此阶段原边的励磁电感 L_m 储能，副边电流开始上升。见下图 9 所示：

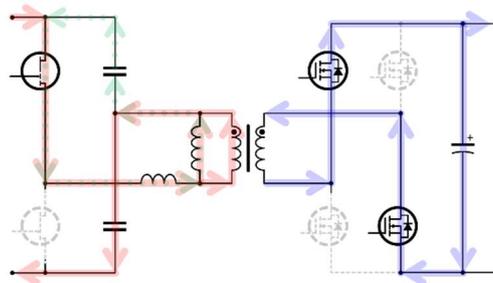


图 10 S1 开启 S2 关断后的电路状态

- b) 当副边电路逐渐增大达到峰值，原边绕组 N_p 不再有电流流过，不再给副边供给电能。此时负载由输出电容 C_{out} 供能。原边电流保持原来方向继续为 L_m, C_r 储能。此时电容 C_{r1} 放电、 C_{r2} 充电。此时的电路见下图：

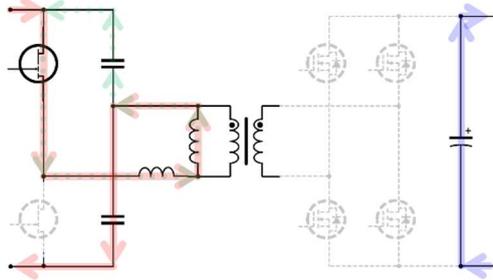


图 11 S1 保持开启 S2 保持关断，原边停止给副边传递能量

- ② 原边侧功率半桥上管 S1 关断，下管 S2 保持截止状态时：
这个阶段一般称为死区时间 (Dead time)，在这个阶段里，虽然 S1 和 S2 关断，由于电感的存在，要保持电流的方向。励磁电流会继续通 S2 管的寄生电容形成回路，电流逐渐减小。电容 C_{r1} 充电、 C_{r2} 放电。此时 S2 管工作在第二象限，为 ZVS 工作准备好了条件。见下图所示：

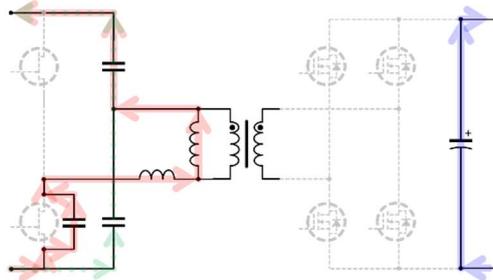


图 12 S1 和 S2 保持关断，处于死区时间，原边停止给副边传递能量

- ③ 原边侧功率半桥上管 S1 保持截止状态，下管 S2 开通时：
a) Busbar 母线电流经谐振电容 C_{r1} → 变压器 → 谐振电感 → S2 回到 Busbar。与此同时，电容 C_{r2} 放电、 C_{r1} 充电，前者电压下降，后者电压上升。
此阶段原边的励磁电感 L_p 储能，副边电流开始上升，见下图 12：

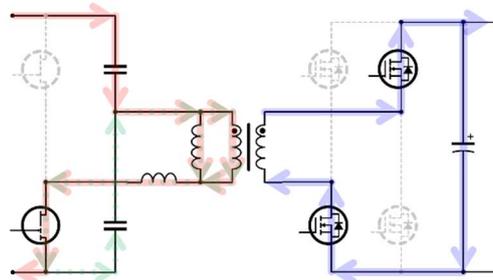


图 13 S1 关断 S2 开通后的电路状态

- b) 当副边电路逐渐增大达到峰值，与之前①步骤类似，原边绕组 N_p 不再有电流流过，不再给副边供给电能。此时负载由输出电容 C_{out} 供电。原边电流保持原来方向继续为 L_m , C_r 储能。此时电容 C_{r2} 放电、 C_{r1} 充电。此时的电路见下图：

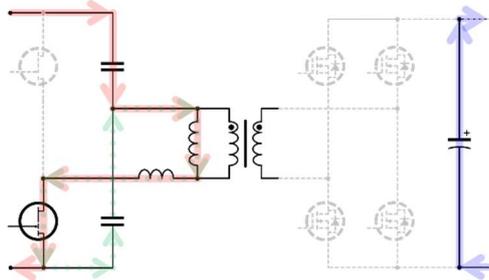


图 14 S2 保持开启 S1 保持关断，原边停止给副边传递能量

- ④ 原边侧功率半桥下管 S2 关断，上管 S1 保持截止状态时；
与步骤②类似，虽然 S1 和 S2 关断，由于电感的存在，要保持电流的方向。励磁电流会继续通 S1 管的寄生电容形成回路，电流逐渐减小。电容 C_{r2} 充电、 C_{r1} 放电。此时 S1 管工作在第二象限，为 ZVS 工作准备好了条件。见下图所示：

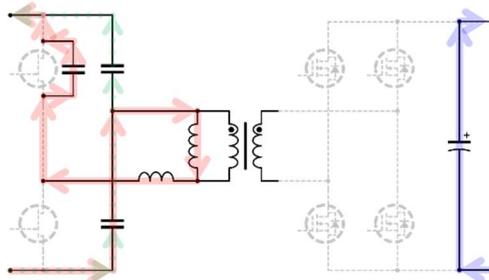


图 15 S1 和 S2 保持关断，处于死区时间，原边停止给副边传递能量

4.3 对称半桥 LLC 谐振变换器中原副边开关管的电流工作状态

在上面的 LLC 谐振变换器的工作分析中可知，开关管会工作在正向导通和反向续流两种工作状态。如下图所示：

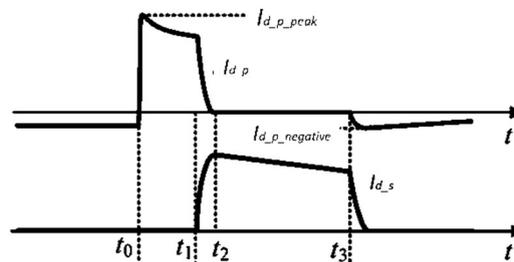


图 16 LLC 电路中原副边开关管的电流(原边电流 I_{d_p} ，副边电流 I_{d_s})工作状态

4.4 为什么采用 E-mode GaN?

使用传统的 Si 或 SiC MOSFET，实现 LLC 谐振变换器的工作。在原边开关管工作时需要开关管的续流二极管 FWD 续流，此时会导致二极管的损耗以及续流结束后，二极管 PN 结由于充满了电荷，需要反向续流释放，会导致额外的损耗和 EMI 骚扰。见下图所示：

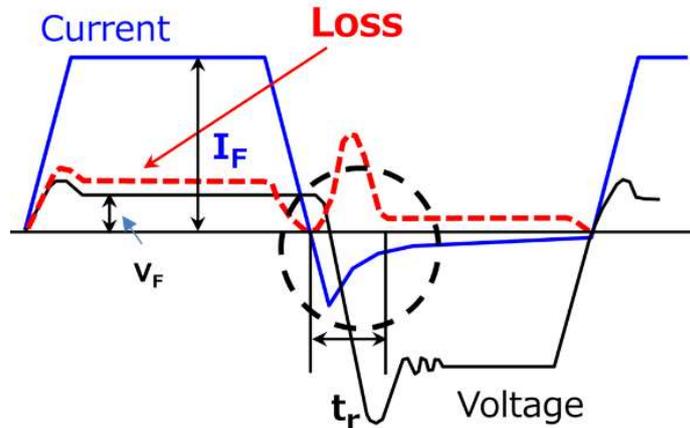


图 17 二极管的导通和关断损耗以及关断时的反向续流

E-mode GaN 的横向结构由一个源极 (Source) 和一个漏极 (Drain) 通过二维电子气 (2DEG) 通道连接而成。栅极电压控制着通道的导电性。在第三象限运行中，漏极和源极的角色互换。此时，漏极电位低于栅极，从而打开 GaN 器件并允许反向导通，而无需体二极管。

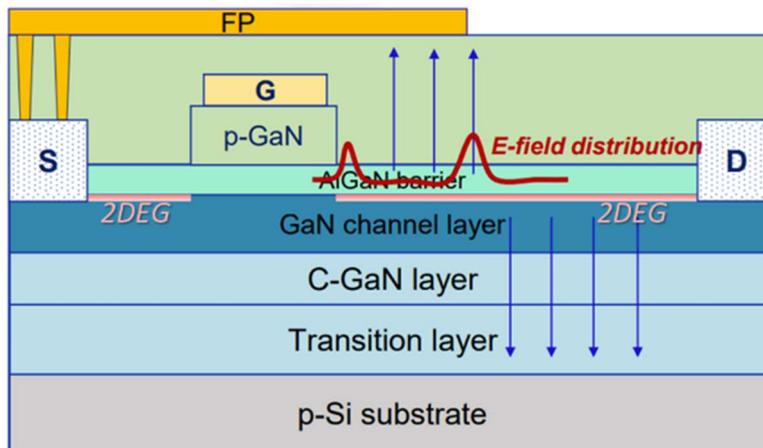


图 18 E-mode GaN 的结构图

本评估板采用了云镓自主研发设计 E-mode GaN 器件，产品型号 [CG65030TBD](#)，最大导通电阻 30mΩ。[CG65030TBD](#) 是一款采用 TO-Leaded 顶侧冷却 (TOLT) 封装的 650V 硅基氮化镓 (GaN-on-Si) 增强型功率晶体管。氮化镓 (GaN) 的特性使其具有高电流、高击穿电压和高开关频率。TOLT 封装具有优异的散热性能、低寄生电阻/电感和高可焊性，能够充分释放器件潜力，使 GaN 器件更适用于工业应用。评估板中 E-mode GaN 器件 ([CG65030TBD](#)) 及其驱动器见下图所示：

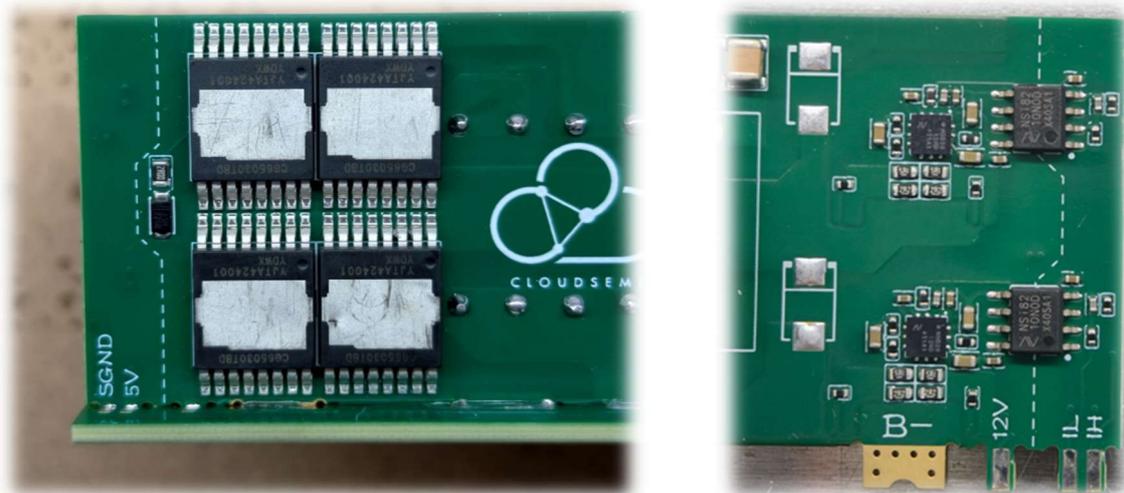


图 19 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 原边 E-mode GaN (左) 及其驱动芯片 (右)

5. CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的详细设计

5.1 对称半桥 LLC 谐振变换器分析

对称半桥 LLC 谐振变换器，如果采用 SJ MOSFET 和 E-mode GaN 其对比见下面内容：

对比器件：

- SJ MOSFET ——IPZA65R029CFD7 ——厂家英飞凌 Infineon
- E-mode GaN ——CG65030TBD ——厂家云矽半导体 CloudSemi

表 4：SJ MOSFET 和 E-mode GaN 的对比

编号	参数	Si SJ MOSFET	E-mode GaN	备注
		IPZA65R029CFD7	CG65030TBD	
1	V _{DS}	650V	650V	相同耐压规格
2	R _{DSon(25°C)}	24mΩ(typ), 29mΩ(max)	25mΩ(typ), 30mΩ(max)	相近导通内阻
3	R _{DSon(150°C)}	53mΩ(typ)	55mΩ(typ)	相近温度系数
4	Q _G	145nC	14.3nC	GaN 开关更快，驱动损耗更低
5	Q _{oss @ 400V}	1056nC	133nC	GaN 输出电容充放电速度更快
6	E _{oss @ 400V}	19.8μJ	18μJ	GaN 输出电容储存能量更少
7	Q _{rr}	1600nC	0nC	GaN 无 FWD, 无反向恢复电荷

根据表 4，如果选用导通阻抗同一水平的 Si SJ MOSFET 和 E-mode GaN，由于后者拥有更快的开关速度，更小的输出的电容电荷，且没有寄生续流二极管(FWD)，因此没有反向恢复电荷带来的损耗，如果客户追求更高效的设计，E-mode GaN 将是一种非常理想的选择。

5.2 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的详细设计

下图为云矽半导体自主设计的对称半桥 LLC 谐振变换器的电路图及 layout:

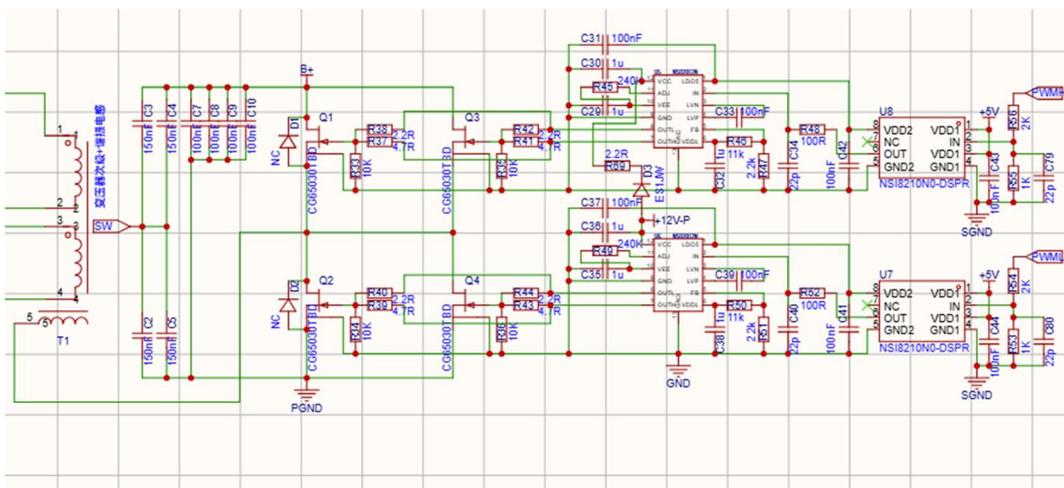


图 27 对称半桥 LLC 谐振变换器主功率电路图（原边电路）

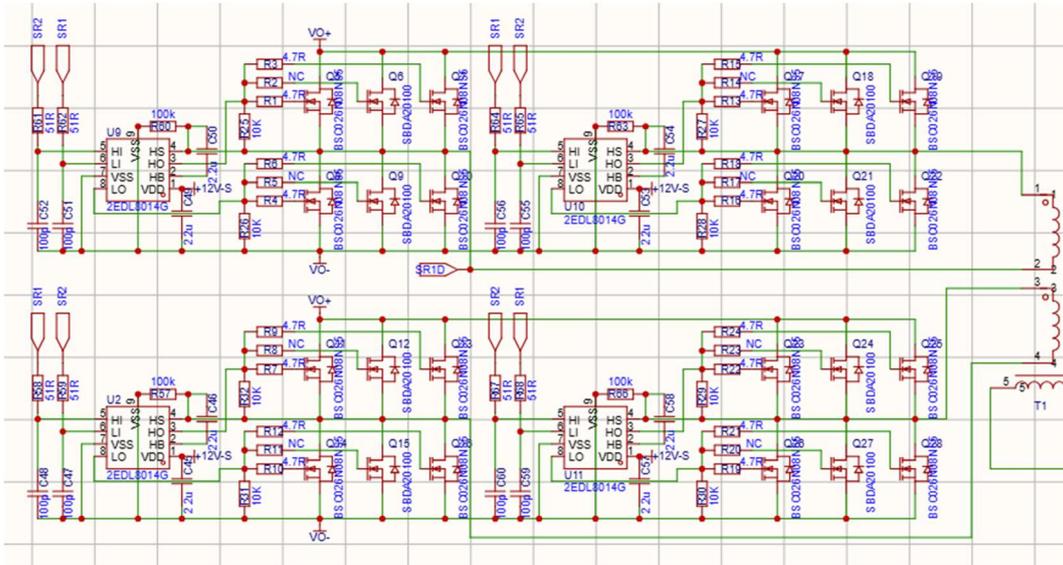


图 28 对称半桥 LLC 谐振变换器主功率电路图（副边同步整流电路）

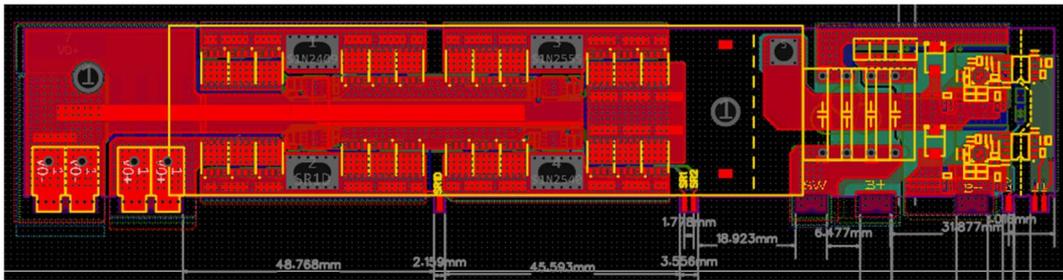


图 29 对称半桥 LLC 谐振变换器主功率电路图 layout

下图为对称半桥 LLC 谐振变换器母版的电路图及 layout:

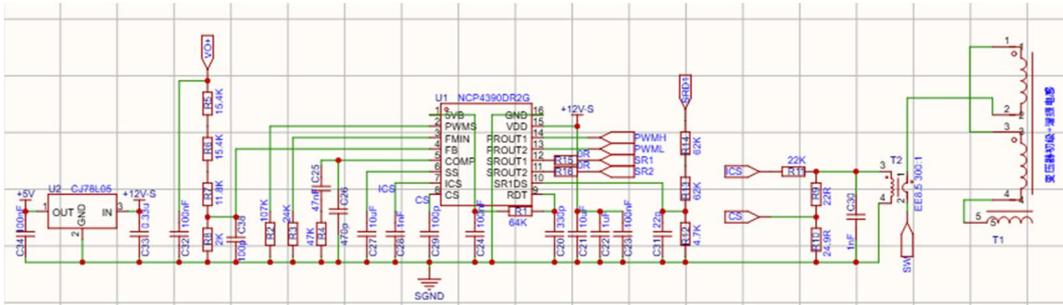


图 30 对称半桥 LLC 谐振变换器母板电路图

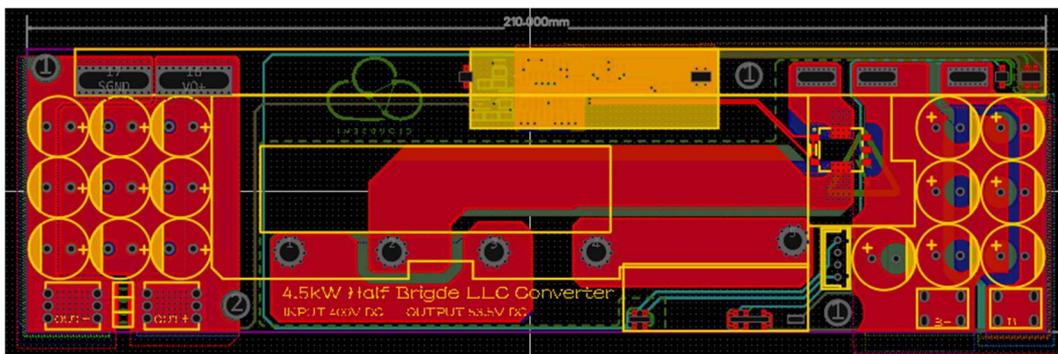


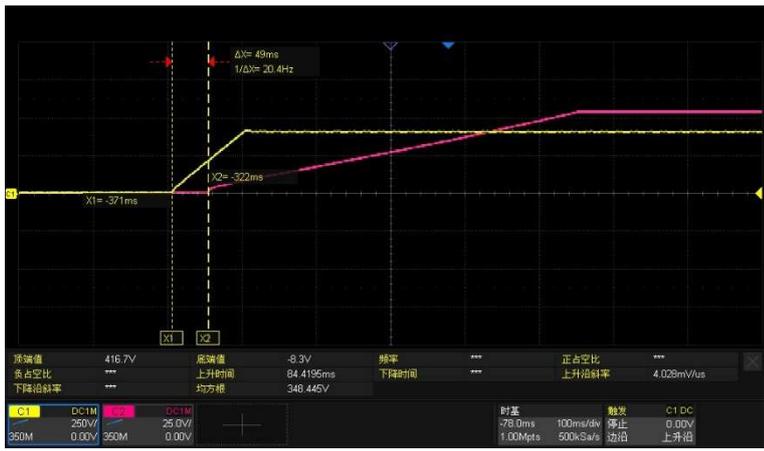
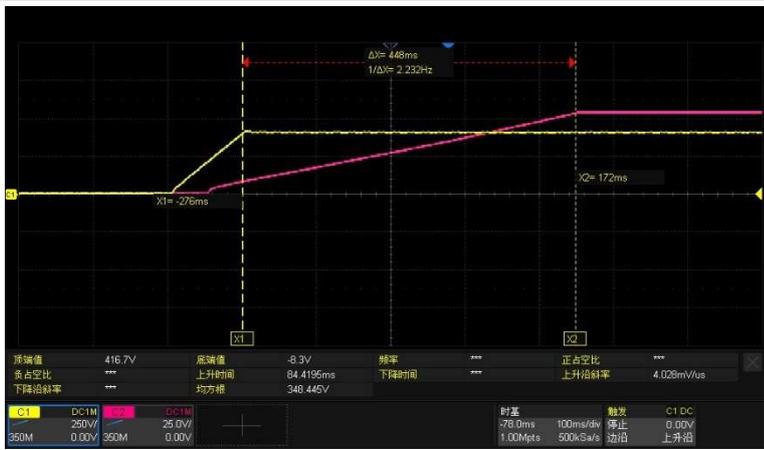
图 31 对称半桥 LLC 谐振变换器母板 layout

5.3 CG-EVB-SHB-LLC-4.5KW 评估板的测试结果

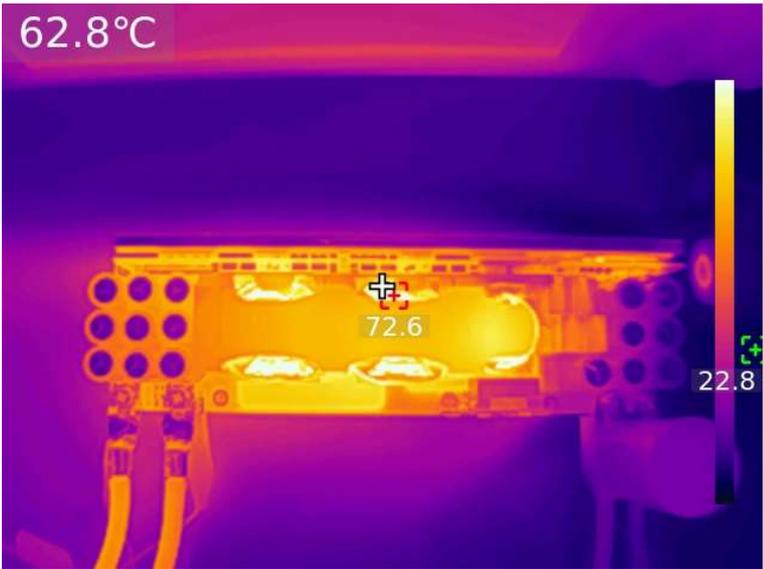
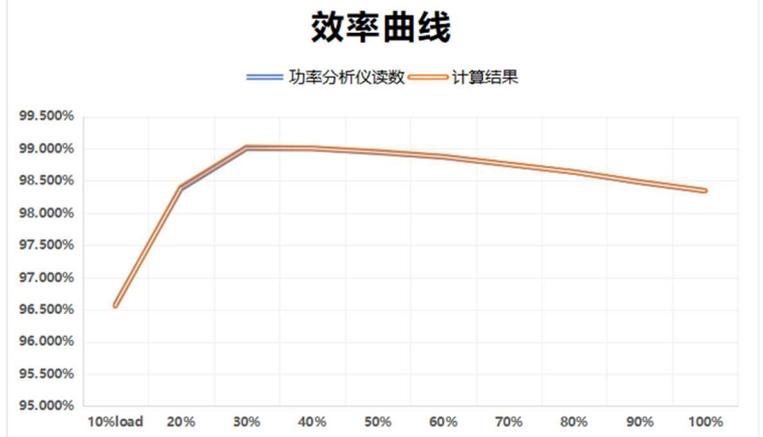
实验测试波形如下表所示：

表 5:

序号	名称	测试波形
1	半载输出纹波电压	<p>① 实测峰峰值 1.220V，纹波率大约为 2.28%；</p>
2	满载输出纹波电压	<p>② 实测峰峰值 1.467V，纹波率大约为 2.74%；</p>

3	BDS 启机 波形测试	
③ 输入输出启动延时, 耗时 49ms;		
4	启机时序 启机时间	
④ 上电至输出建立的时序, 耗时 448ms;		
5	半载测试 V _{GS} 应力	
⑤ 半载时功率半桥上下管的 V _{GS} 应力测试 (蓝色为上管), 无异常波形;		

6	半载测试 V_{DS} 应力	
⑥ 半载时功率半桥上下管的 V_{DS} 应力测试 (红色为上管), 无异常波形;		
7	满载测试 V_{GS} 应力	
⑦ 满载时功率半桥上下管的 V_{GS} 应力测试 (蓝色为上管), 无异常波形;		
8	满载测试 V_{DS} 应力	
⑧ 满载时功率半桥上下管的 V_{DS} 应力测试 (红色为上管), 无异常波形;		

9	满载工作 温度测试	
⑨ 室温情况下，最高温度不到 73°C；		
10	效率曲线	<p style="text-align: center;">效率曲线</p> <p style="text-align: center;">— 功率分析仪读数 — 计算结果</p> 
⑩ 最高效率超过 98.4%。整体效率均超过 97%；		

附录：云镓 E-mode GaN 开关器件 [CG65030TBD](#)

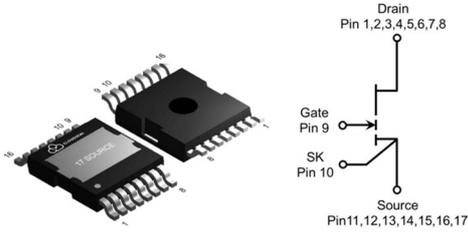
此评估板采用的是云镓高压系列的 [CG65030TBD](#) 分立式 GaN 器件，部分性能见下表所示：

表 6：

编号	名称	符号	数值	单位	备注
1	漏源电压	$V_{SS, max}$	650	V	$V_{GS} = 0 V; I_D = 10 \mu A$
2	漏源通态阻抗	$R_{DS(on), max}$	30	mΩ	$V_{GS} = 6 V; I_D = 20 A; T_J = 25^\circ C$
			55		$V_{GS} = 6 V; I_D = 20 A; T_J = 150^\circ C$
3	门极电荷	Q_G	14.3	nC	$V_{GS} = 0 \text{ to } 6 V; V_{DS} = 400 V;$ $I_D = 60 A$
4	漏源持续电流	I_D	60	A	$T_c = 25^\circ C$
	漏源脉冲电流	$I_{D, Pulse}$	120		$T_c = 150^\circ C; V_{GS} = 6 V$
5	输出电荷	Q_{OSS}	133	nC	$V_{GS} = 0 V; V_{DS} = 400 V; f = 1 \text{ MHz}$
6	反向恢复电荷	Q_{rr}	0	nC	$I_{SD} = 60 A; V_{DS} = 400 V$

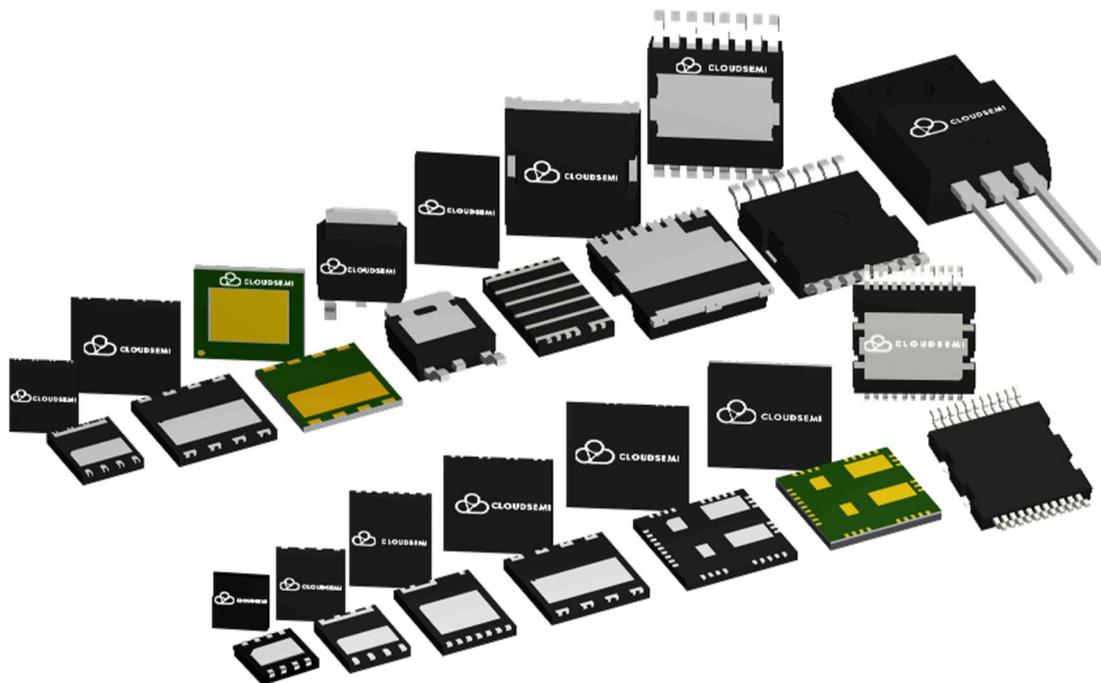
此器件采用顶部散热的 TOLT 封装，方便器件散热并满足瞬时功率的需求。

表 7：

编号	名称	图例说明	备注
1	封装说明 管脚说明		<p>① 标准的 TOLT 封装，设计有开尔文信号地；</p> <p>② 后续有更多形式产品将推出。</p>



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
或联系我们: info@cloudsemi.net.