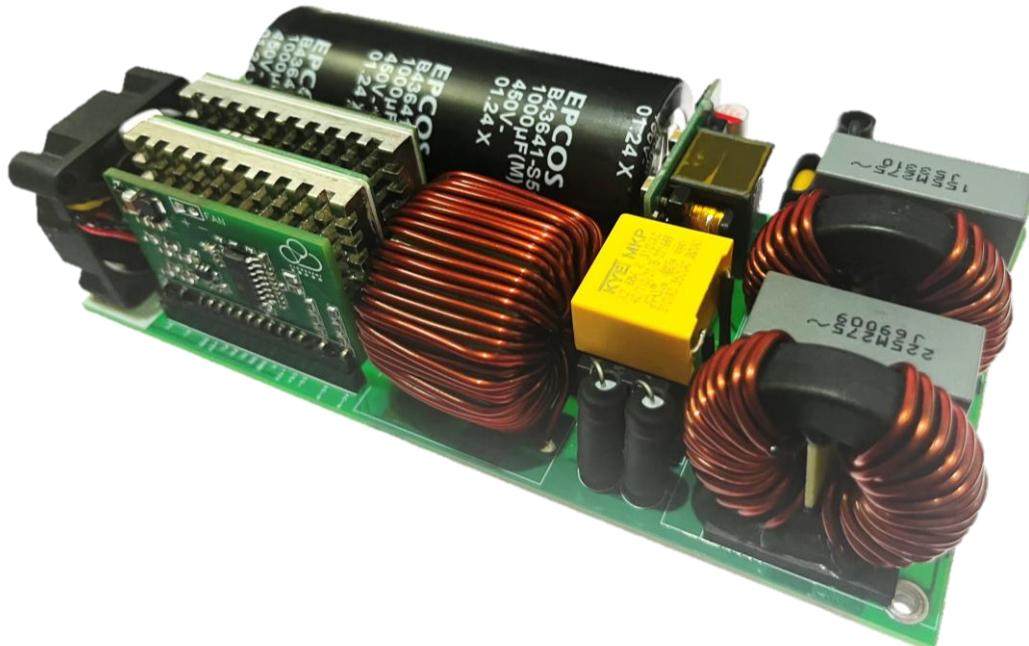


GaN-based 3kW High-Efficiency CCM Bridgeless Totem Pole PFC

Evaluation Board Manual

CG-EVB-BTP-PFC-3KW



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 器件 3kW 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: 3000W

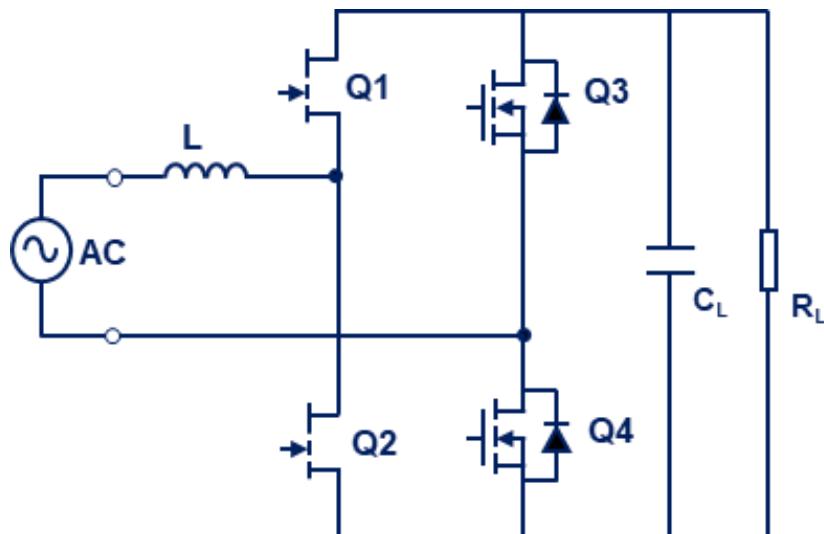
PCBA 尺寸: 140×64.1×37mm (长×宽×高)

GaN 开关频率: 65 kHz

GaN 开关元件: CG65030TAD (Q1 & Q2)

拓扑: CCM 无桥 PFC (如下图所示)

峰值效率: >98.5%



1 文档介绍

本技术文档将重点介绍基于云稼半导体 650V GaN 器件的 3kW 无桥 PFC (BTP-PFC) 评估板，涵盖设计背景、工作原理、设计方案以及测试结果。客户如果感兴趣，可以联系我们，获取更加详细的技术信息。

2 GaN 在 BTP-PFC 中的价值

2.1 传统的 Boost PFC 电路

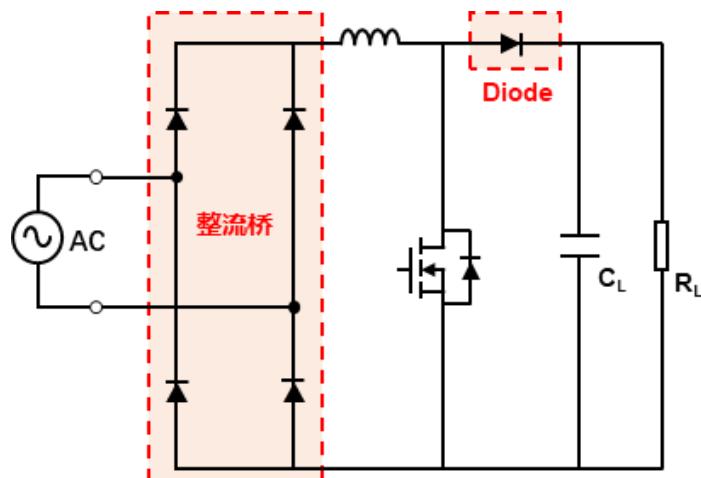


图 1 基于 Boost 拓扑的 PFC 电路

图 1 所示为传统的 PFC 电路，该电路基于桥式整流和 Boost 拓扑构成。Boost 电路可以工作在连续导通模式 (CCM)、断续导通模式 (DCM) 以及临界导通模式 (CrM)。该电路在中小功率的充电器、适配器以及小功率的服务器电源中有着广泛的应用。

该电路的损耗主要来自于整流桥、MOSFET、二极管、电感的铁损/铜损、滤波电容 ESR 损耗等。其中整流桥以及二极管的损耗对于高能效的应用场景有天然的硬伤：1) 由二极管构成的整流桥在整流过程中存在着较高的导通压降（单个二极管正向导通压降~1V，每交流半周电流流经 2 个二极管），由此会带来较高的导通损耗；2) 在 Boost 电路中，因为传统的 Si MOSFET 器件存在着巨大的 Qrr 及反向恢复损耗，无法作为同步整流管使用，故通常使用 SBD 作为续流元件使用（如 SiC SBD），相较于 MOSFET 等开关元件存在着较高的导通压降，也会影响 Boost 级的转化效率。

以 80PLUS 钛金能效标准为例（如表 1 所示），为实现 230VAC 输入且转化效率在 50% 负载条件下要达到 96% 以上，PFC 一级的转化效率必须在 98.5% 以上。

表 1 80PLUS 能效认证标准

		白牌	铜牌	银牌	金牌	铂金	钛金
80PLUS 认证	负载						
		80 PLUS	80 PLUS Bronze	80 PLUS Silver	80 PLUS Gold	80 PLUS Platinum	80 PLUS Titanium
230V Internal Redundant	10%	N/A	--	--	--	--	90%
	20%		81%	85%	88%	90%	94%
	50%		85%	89%	92%	94%	96%
	100%		81%	85%	88%	91%	91%

为实现钛金能效标准，需要将 PFC 电路中的二极管损耗消除，实现无桥 PFC 架构，目前比较通用的无桥 PFC 架构主要为如图 2 所示的图腾柱无桥 PFC。

2.2 无桥 Totem-pole PFC 电路

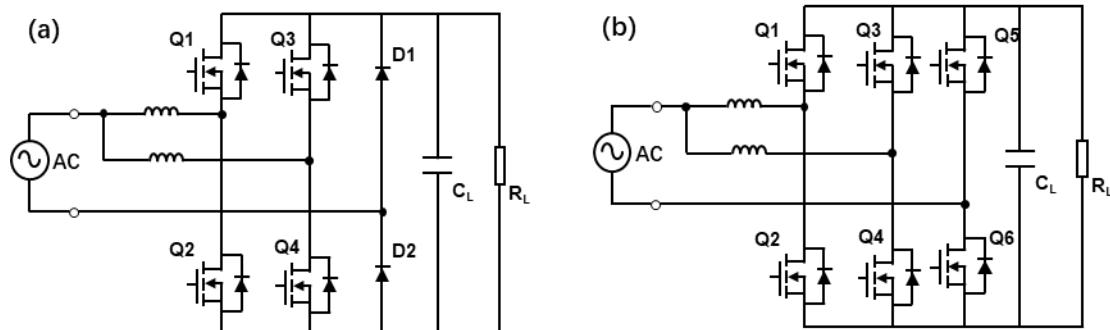


图 2 无桥图腾柱 PFC 电路, a) D1/D2 为工频续流管, (b) 工频桥臂由 MOSFET 构成

图 2 所示为无桥 Totem-pole PFC 电路结构，由 Q1/Q2 构成半桥电路（高频桥臂），如需要提升电路输出功率能力，也可以增加桥臂，多相交错（Q3/Q4），D1/D2 构成低频桥臂（工频 50Hz），D1/D2 也可以由低导通电阻的 MOSFET 构成以降低二极管压降带来的损耗。该拓扑相较于传统 Boost PFC 有诸多好处：

- a) 更高的转化效率：无整流桥，无续流二极管等高损耗元件，效能的提升同时也可以带动功率密度的提升；
- b) 双向输出工作：图腾柱 PFC 具有双向输出能力，特别适合储能，OBC 等应用场景；
- c) 同一桥臂的两个功率管（如 Q1/Q2）在正负半周切换过程中交替工作模式（开关管和续流管），元件寿命可以提升。

2.3 GaN 器件与 BTP-PFC 电路

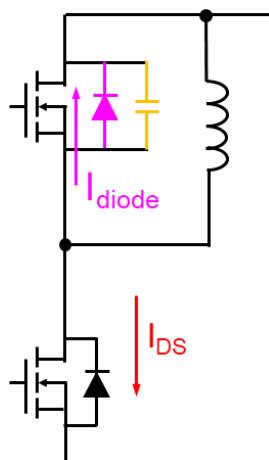


图 3 Qrr 测试电路

如图 3 所示为 Qrr 测试基本电路，当上管关断，电感上的电流从沟道换至体二极管导通模式，在下管开启之前，这段时间称为“死区”。在下管开启的过程中：

- 上管的电流逐渐换至下管，下管的高 V_{DS} 和 I_{DS} 同时存在，该部分会在下管产生 I/V 交叠损耗；
- 上管因为体二极管导通而产生的少数载流子存储效应，会产生反向恢复电荷 Q_{rr} 损耗 ($Q_{rr} \cdot V_{bus}$)；
- 上管 C_{oss} 极板上存储的电荷，会和下管的 C_{oss} 电荷，一并通过下管沟道泄放掉，产生 Q_{oss} 损耗 ($Q_{oss} \cdot V_{bus}$)。

如上损耗构成元件在硬开关下的开关损耗。详细的计算可参考云稼应用指导 (<https://cloudsemi.net/design/index-27.html>)

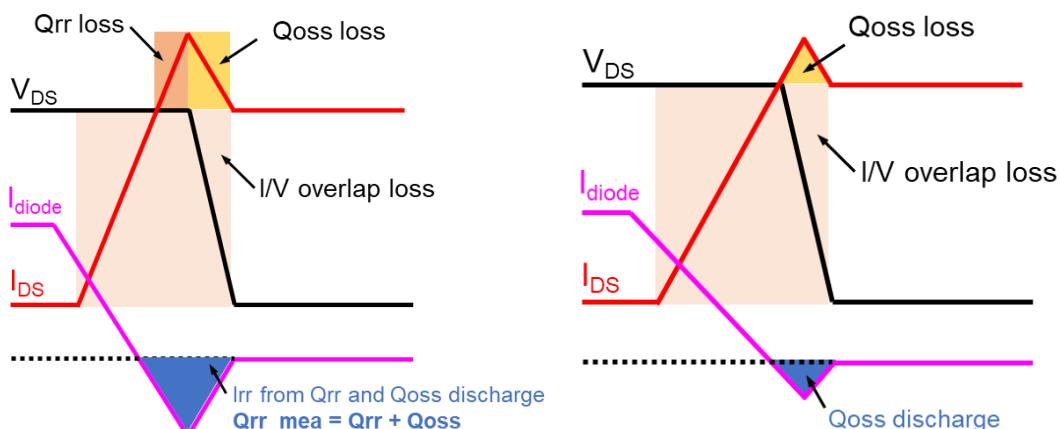


图 4 (left) Si MOSFET 硬开通波形示意图 (right) GaN HEMT 硬开通波形示意图

图 4 所示为 Si MOSFET 和 GaN HEMT 硬开通的电压/电流波形示意图。在 Si MOSFET 开通过程中，Qrr 损耗会在电流波形中有明显体现，而 GaN HEMT 中无该部分损耗的体现。

表 2 为 Si CoolMOS 与云稼 GaN HEMT 基本参数对比，在相近导通内阻情况下，Si CoolMOS 的 Qoss 损耗就达到 GaN HEMT 的将近 10 倍，Qrr 损耗部分更决定了 Si MOSFET 在 TP-PFC 电路中无法工作在硬开关工作模式下，只能采用 CrM 或者 DCM 模式。相比之下，GaN Qoss 损耗更低，Qrr 损耗部分为 0，适合工作在硬开关的桥式电路中。

表 2 Si CoolMOS 与 GaN HEMT 基本参数对比

Parameters	Si CoolMOS IPZA65R029CFD7	云镓 GaN CG65030TAD
Voltage rating	650V	650V
Max Rdson	29mΩ	30mΩ
Qg	145nC	14.3nC
Qoss @ Vds = 400V	1056nC	133nC
Qrr	1600nC	0nC

图 5 为两种工作模式下的 BTP-PFC 电感电流与 RMS 电流的示意图。由于 Si CoolMOS 器件的 Qrr 损耗太大，其无法工作在硬开关模式下，故一般选择 CrM 模式，在这种软开关的工作模式下，电感电流峰值会达到 RMS 电流的两倍（如图 5a 所示），在功率器件上的应力会比较大。在相同时级功率的情况下，需要 Si MOSFET 具备更低的导通电阻。

而 GaN 器件无 Qrr 损耗，其在 BTP-PFC 电路中可以工作在硬开关模式，电感电流峰值是 CrM 模式下的一半，在功率器件上的应力更小，在高功率应用场景 (>3kW)，有机会使用更少数量的高频桥臂元件。

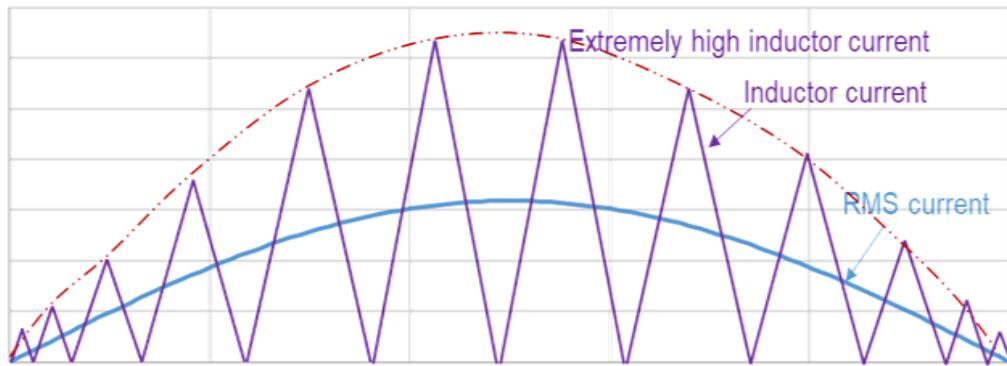


图 5 (a) BTP-PFC 电路在 CrM 工作模式下电感电流与 RMS 电流的关系

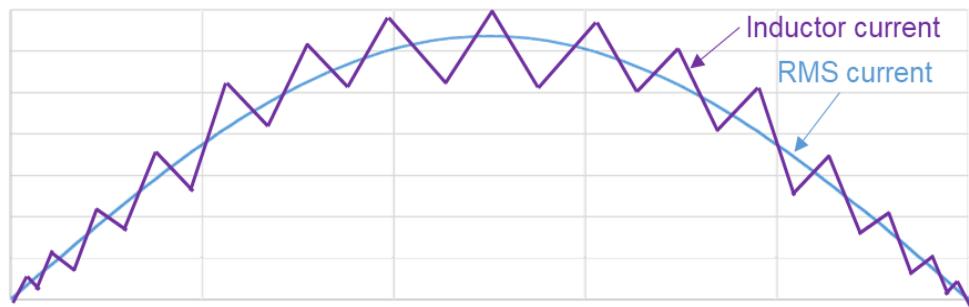


图 5 (b) BTP-PFC 电路在 CCM 工作模式下电感电流与 RMS 电流的关系

2.4 GaN BTP-PFC 工作原理

无桥图腾柱 PFC 的电流流向图如图 6 所示。

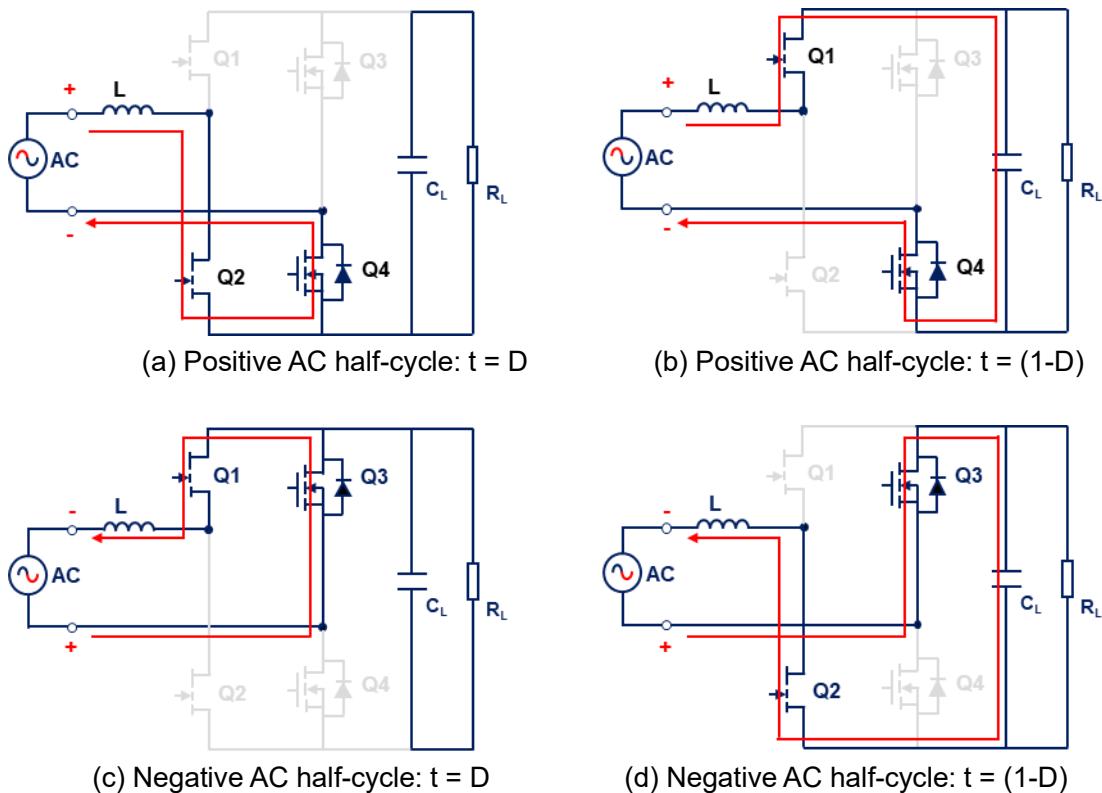


图 6 无桥图腾柱 PFC 电路中在不同 AC 输入半周内的电流流经路径

在 AC 输入正半周期内，Q1/Q2/Q4 与电感组成一个类似 boost 电路，Q3 不工作，其中 Q2 为开关管，Q1 为续流管。当 Q2 打开/Q1 关断，电感上的电流流经 Q2/Q4，逐渐上升；当 Q1 打开/Q2 关断，电感上的电流通过 Q1/Q4 进行续流。

在 AC 输入负半周期内，Q1/Q2/Q3 与电感组成一个类似 boost 电路，Q4 不工作，其中 Q1 为开关管，Q2 为续流管。当 Q1 打开/Q2 关断，电感上的电流流经 Q1/Q3，逐渐上升；当 Q2 打开/Q1 关断，电感上的电流通过 Q2/Q3 进行续流。

由以上分析可知，Q1 和 Q2 两个 GaN HEMT 器件在每个 AC 半周期内，开关和续流的模式是交替的，在整个生命周期内，Q1 和 Q2 分别都只有一半时间是在硬开关模式工作。

3 GaN BTP-PFC 设计案例

云稼半导体基于无桥图腾柱 PFC 电路结构，使用 CG65030TAD E-mode GaN 功率器件（650V/30mΩ/TOLL 封装），搭建了一套 PFC 评估板，评估板的基本信息如表 3 所示：

表 3 3kW 无桥图腾柱 PFC 评估版基本信息

参数	数值
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	3000W
PCBA 尺寸	140×64.1×37mm (长×宽×高)
GaN 开关频率	65kHz
GaN 开关元件	CG65030TAD (Q1 & Q2)
峰值效率	>98.5%
输出电压纹波	<5%

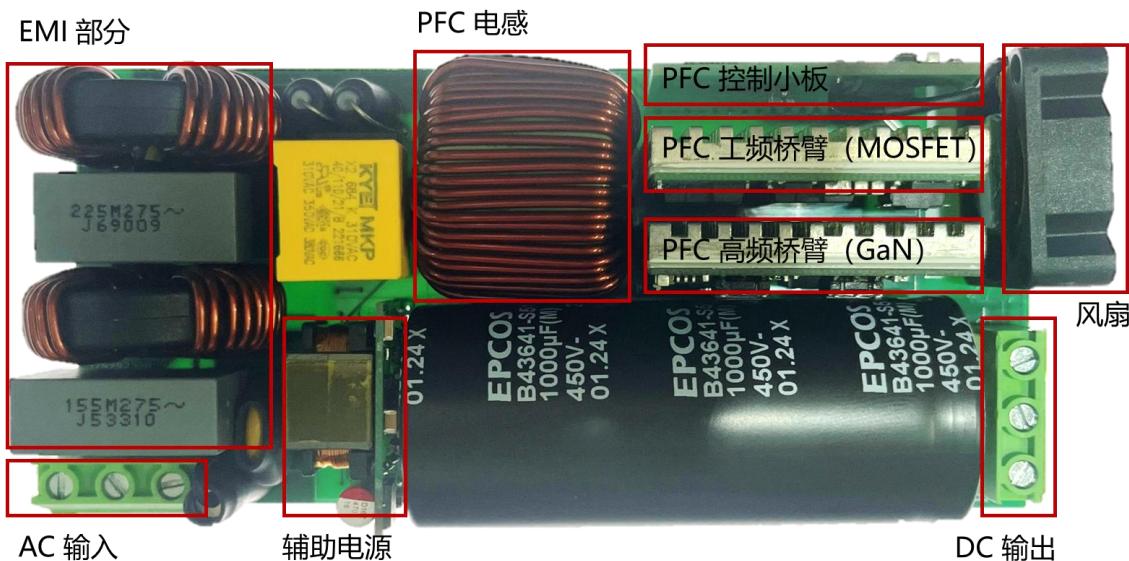


图 7 无桥图腾柱 PFC 评估板实物照片

该无桥图腾柱 PFC 评估板主要由以下几部分组成：

- (a) 功率母板：主要由输入/输出端子，EMI 滤波，PFC 电感，散热风扇等组成；
- (b) 辅助电源：反激拓扑，为板上控制器/驱动/风扇等提供供电，小板输入为 400V 母线；
- (c) PFC 控制小板：基于矽递 IVC1104DR PFC 控制器，采用纯模拟控制方式；
- (d) PFC 工频桥臂：采用东微半导体超结 MOS，型号 OSG60R037TT4EZF，单颗器件导通电阻为 $37\text{m}\Omega$ ，两两并联使用；
- (e) PFC 高频桥臂：采用云稼半导体 650V E-mode HEMT 器件，型号 CG65030TAD，单颗器件最大导通电阻为 $30\text{m}\Omega$ ；驱动选择纳芯微 NSD2012N（单通道 GaN 专用驱动，自带负压关断功能）。

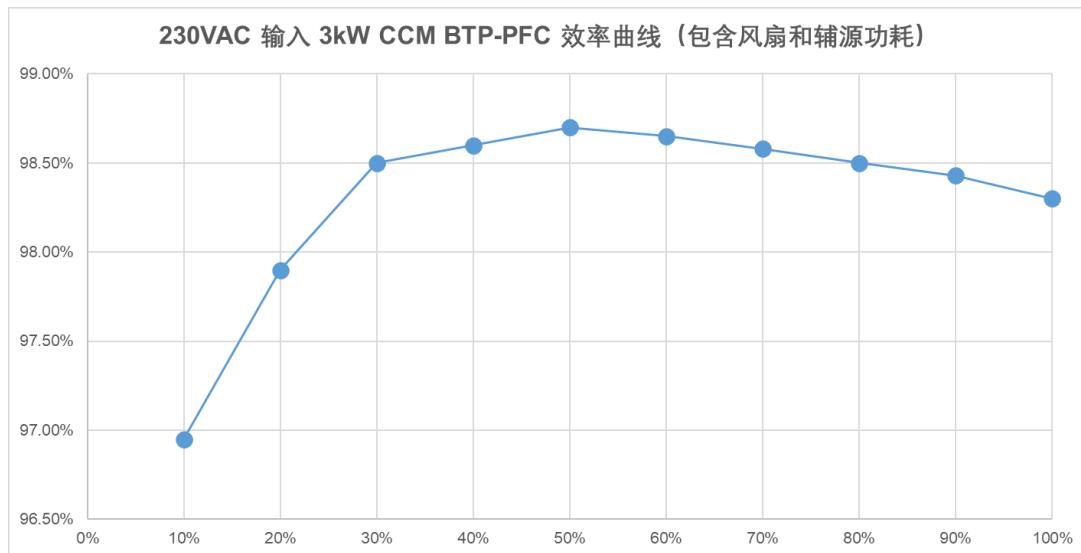


图 8 无桥图腾柱 PFC 效率曲线（输入 AC230V）

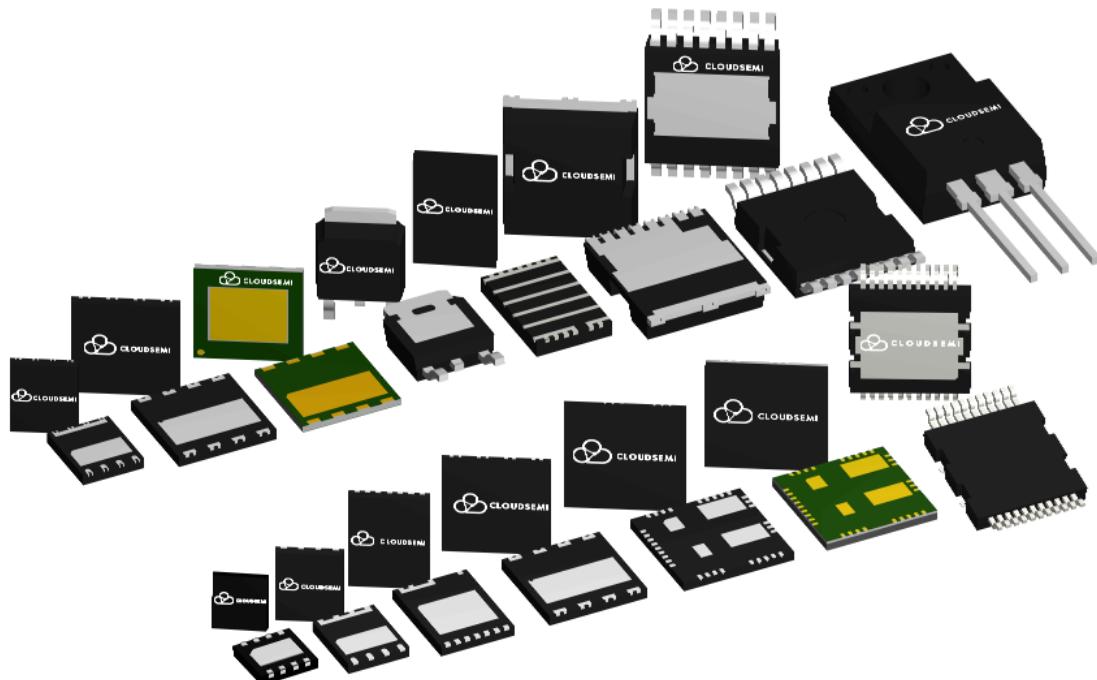
图 10 为本评估板测得的 PFC 效率，在输入 AC230V 条件下，峰值效率最高可以达到 98.7%（包含风扇和辅源损耗）。更多详细资料请联系云稼半导体。

4 结论

本设计案例讲解了无桥 PFC 的价值以及 GaN 器件因为先天的器件性能优势，具备在 PFC 电路中的优势。同时，云稼半导体基于自研 GaN 器件 CG65030TAD 完成了基于纯模拟方案的 PFC 评估板，论证了 GaN 器件在 PFC 中的价值以及云稼 GaN 器件的性能。



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
或联系我们：info@cloudsemi.net.