

John Gomez

摘要

随着快速充电系统的发展趋势和不断增长的电源需求，迫切需要创建具有小尺寸的便携式设计。小型、高功率密度电源设计已占据了消费类交流/直流市场的当下份额，重点是高效和可靠的能源转换。本应用手册讨论了如何考虑两个要点（通过使用集成 GaN 技术管理热性能和提高开关频率）来创建可靠的高功率密度设计。这些讨论参考了消费类适配器来提供众所周知的背景信息，讨论这些类型设计的背景和挑战。但是，本应用手册中提供的信息可应用于高功率密度和效率是设计不可或缺一部分的任何电源系统。

内容

1 引言	2
1.1 设计要求 1：管理由功率损耗引起的热量.....	2
1.2 设计要求 2：通过高频切换降低储能要求.....	2
2 GaN 价值简介	4
3 有源钳位反激式	5
3.1 降低功率损耗 1：零钳位损耗.....	5
3.2 降低功率损耗 2：零电压开关.....	5
4 GaN 在有源钳位反激式中的价值	6
5 利用集成 GaN 简化 ACF 级	7
6 使用 LMG2610 集成半桥和 UCC28782 ACF 控制器的物理设计实现方案	9
6.1 UCC28782EVM-030.....	9
6.2 PMP23146.....	11
7 利用适用于 ACF 的设计工具	13
8 总结	13
9 参考文献	14

插图清单

图 1-1. 在 65W 转换模式反激式转换器中得到的开关频率与变压器磁化电感间的关系.....	3
图 2-1. 显示 C _g 、Q _g 、C _{oss} 、Q _{oss} 、无体二极管的高级 GaN 结构.....	4
图 3-1. 有源钳位反激式功率级.....	5
图 4-1. 使用硅 FET 与 GaN FET 的 ACF 级的电流波形.....	6
图 5-1. ACF 的实际实施.....	7
图 5-2. LMG2610 方框图.....	7
图 5-3. 具有 UCC28782 控制器和 LMG2610 集成 GaN 半桥的 ACF 功率级.....	8
图 6-1. 采用高密度配置的 UCC28782EVM-030.....	9
图 6-2. UCC28782EVM-030 在各种负载下的效率.....	9
图 6-3. V _{in} = 115V _{ac} 顶面.....	10
图 6-4. V _{in} = 115V _{ac} 底面.....	10
图 6-5. V _{in} = 230V _{ac} 顶面.....	10
图 6-6. V _{in} = 230V _{ac} 底面.....	10
图 6-7. PMP23146 服务器辅助电源参考设计.....	11
图 6-8. PMP23146 背面.....	11
图 6-9. PMP23126 在各种负载下的效率.....	12
图 6-10. PMP23126 热感图像.....	12

表格清单

表 6-1. UCC28782EVM-030 规格.....	9
表 6-2. PMP23146 规格.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

1.1 设计要求 1：管理由功率损耗引起的热量

在任何电源转换中，经常讨论的品质因数可能是效率。尽管高效的电源转换系统确实可以节省总体能耗，但对于许多应用而言，高效设计背后的更大动机是能够降低系统中的功率损耗，此类功率损耗表现为不必要的热源。例如，在小型封闭电源适配器的环境中，必须控制热量以确保系统可靠运行。这包括将所有元件（从半导体到储能元件，例如电感器或电容器）的温度保持在可接受的水平。在低效电源系统中，高功率损耗会导致过多的互热，这使得没有大型散热器几乎无法散热。此外，商用电源适配器具有外部外壳温度要求，必须遵循这些要求，以确保消费者的安全和易用性。外壳越小，控制各个元件的温度就越困难。

随着市场中缩小这些适配器的趋势仍在继续，降低功率损耗（或提高效率）对于在小型封装中提供足够的热管理至关重要。基本问题如下：创建更小的电源需要更好的热管理，而更好的热管理需要更高的运行效率。考虑到这一点，如果目标是创建小型设计，那么设计问题不是如何获得出色效率，而是如何为创建符合给定尺寸要求且散热可靠的设计实现所需的效率。

1.2 设计要求 2：通过高频切换降低储能要求

必须予以讨论的高功率密度设计的另一个方面是开关频率以及与系统储能要求的关系。这是通常说的增加开关频率会减小电源转换器的尺寸。更深入地进行分析，提供给负载的直流电源由电源转换器进行处理，该转换器的基本工作原理是将输入的能量存储一段时间，然后将其释放到负载。向负载提供的功率由两个因素决定：每个周期可存储然后又释放的能量，以及执行此过程的频率。

打个比方，假设必须在规定的时间内从一个港口向另一个港口运送大量货物。一方面，考虑 **a)** 一艘货船，它只需往返几次即可运完这批货物。与此相反，请考虑 **b)** 一艘快艇，它可以多次快速往返，每次装运少量货物。在这个类比中，船舶上的货物代表存储的能量，而往返次数代表开关频率。最后，货船和快艇在相同的时间内装运相同数量的货物（能量），并保持恒定功率。虽然装运的最终结果是相同的，但这两种情况有两个不同之处：**a)** 以较低的频率传输更多的储存能量，**b)** 以较高的频率传输更少的储存能量，即 [方程式 1](#)。

$$P = \text{constant} = E_{\text{stored}} \times f_{\text{SW}} \quad (1)$$

在电源转换器中，这种储能机制由最大的元件（主要是电感器和变压器等磁性元件）执行。对于磁性元件，尺寸与储能成正比，而储能则与电感成正比，即 [方程式 2](#)。

$$\text{Size} \propto E_{\text{stored}} \propto L \quad (2)$$

备注

虽然较大的大容量电容器是交流/直流系统不可或缺的一部分，但此处不考虑电容器，因为电容器依赖于较慢的 50/60Hz 线路频率（而非较快的开关频率），因此在减小尺寸时几乎无能为力。在小型交流/直流设计中，人们非常关注磁性元件，其中储能直接由开关频率的要求决定。

由于这种关系，小型设计必须以高频进行切换，以降低储能要求，从而减小整体尺寸。如 [图 1-1](#) 所示，给定功率水平的电感（储能）要求与开关频率成反比。但请务必记住，开关损耗是由开关频率的增加引起的，并且可能会成为散热问题。以下各节将介绍有关如何减轻这些损耗的技术。

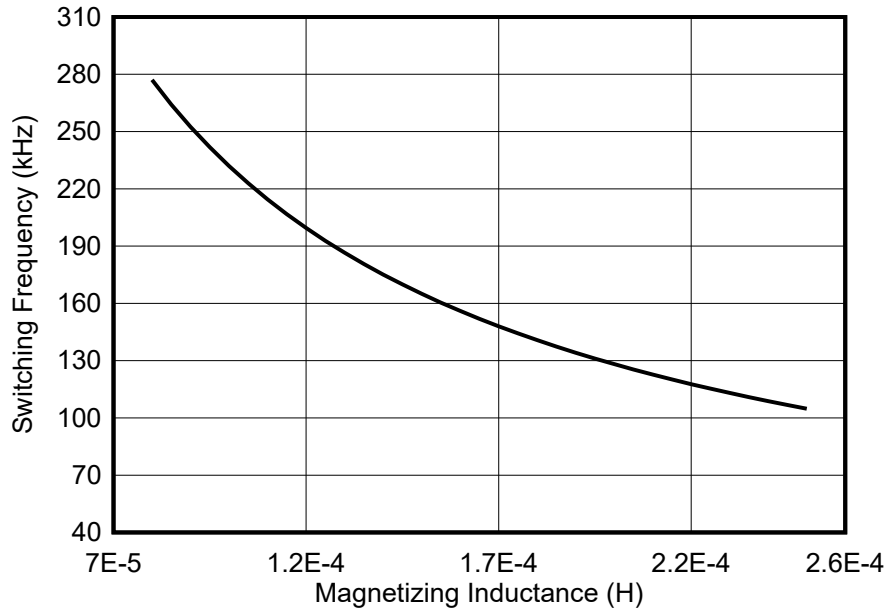


图 1-1. 在 65W 转换模式反激式转换器中得到的开关频率与变压器磁化电感间的关系

2 GaN 价值简介

考虑到最后两个设计要求，GaN 技术可用于解决在管理热性能和高频切换时遇到的挑战。这是通过 GaN 相对于硅拥有的三个主要优势实现的：给定电阻下的电容更小、开关速度更快（不要与开关频率混淆），以及因没有体二极管而实现零反向恢复损耗。

集成 GaN 器件在低栅极电容和栅极电荷（ $1\text{nC-}\Omega$ 对比 Si $4\text{nC-}\Omega$ ）下的开关速度更快。通过低输出电容和输出电荷（ $5\text{nC-}\Omega$ 与 Si $25\text{nC-}\Omega$ ）降低开关损耗，并在没有体二极管的情况下消除反向恢复损耗

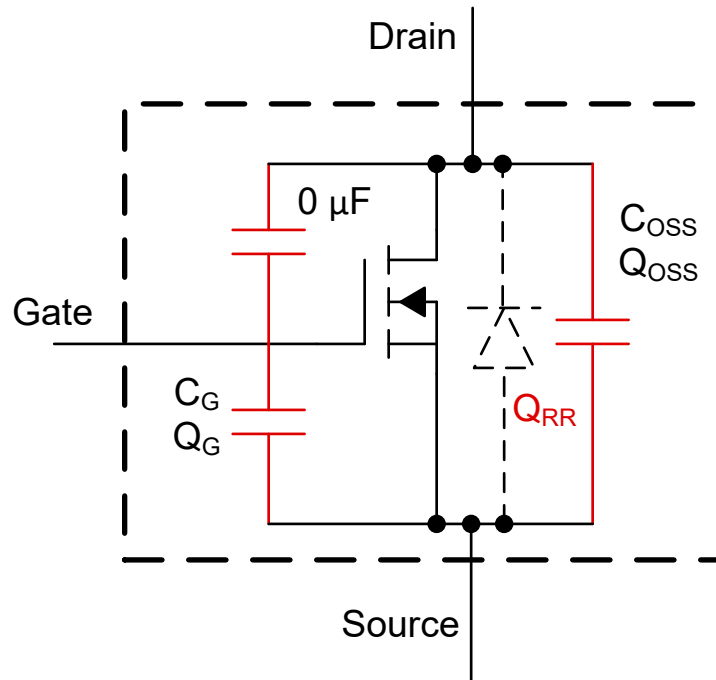


图 2-1. 显示 C_g 、 Q_g 、 C_{oss} 、 Q_{oss} 、无体二极管的高级 GaN 结构

3 有源钳位反激式

GaN 的这些特性之一在有源钳位反激式 (ACF) 中可能非常有价值，ACF 是解决散热和储能挑战的高效电源转换器拓扑之一。

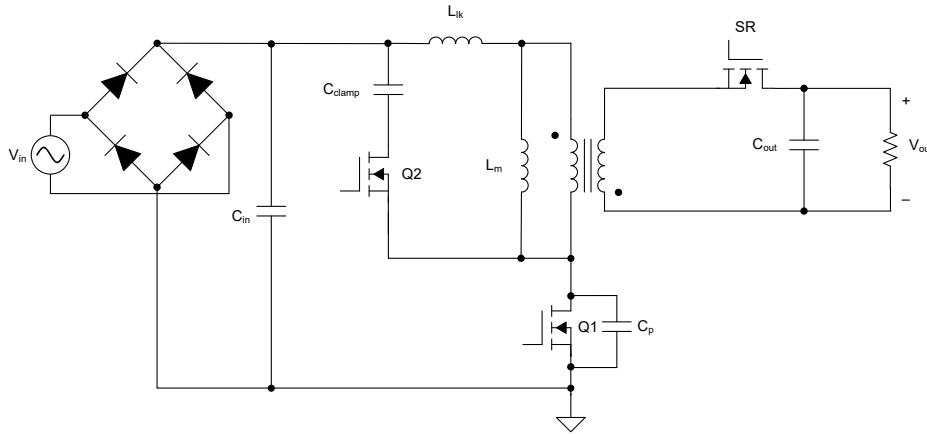


图 3-1. 有源钳位反激式功率级

与传统的反激式相比，ACF 可通过以下方式显著降低功率损耗：

1. 以零钳位损耗消除传统缓冲器钳位中的损耗
2. 通过零电压开关 (ZVS) 降低开关损耗

这两种机制都通过配置开关器件、磁化电感、钳位电容器和寄生元件（例如漏电感和器件电容）来实现。节 3.1 和节 3.2 中详细介绍了这些功耗降低机制的基本操作。

3.1 降低功率损耗 1：零钳位损耗

通常，低功耗应用采用反激式转换器来实现简单性和成本优势。此类设计使用具有固有漏电感的反激式变压器，这可能导致初级 FET (Q1) 上出现不受控制的电压尖峰。在 ACF 中，变压器漏电感 L_{lk} 产生的多余能量通过高侧 FET Q2 存储在钳位电容器 C_{clamp} 中。然后，这些泄漏能量与磁化电感能量一起通过谐振过程释放到输出端。这里的主要优势是泄漏能量可以释放到输出端，而不是通过无源钳位耗散。 C_{clamp} 电容器充当有源钳位，因此得名有源钳位反激式。

3.2 降低功率损耗 2：零电压开关

由于需要高开关频率运行以减小系统的尺寸，因此必须特别注意与频率相关的开关损耗，如方程式 3 所示。

$$P_{\text{loss:sWitching: turn-on}} = \frac{1}{2} C_p \times V_{ds}^2 \times f_{sw} \quad (3)$$

这里必须注意的是，开关损耗与开关频率 f_{sw} 成线性正比。必须通过 ZVS 来降低这些产生的开关损耗。为了实现 ZVS，必须在 Q1 导通之前对存储在低侧 FET Q1 的器件输出电容 C_p 中的能量进行放电。这是通过在磁化电感 L_M 中建立负电流 I_{M-} 来实现的，在 Q2 关闭后可立即从 C_p 中获得该电流。当 Q1 导通时， C_p 放电，漏源电压为零伏，从而实现零损耗导通转换，如方程式 4 所示。

$$P_{\text{loss:sWitching: turn-on: ZVS}} = \frac{1}{2} C_p \times V_{ds}^2 \times f_{sw} = 0 \quad (4)$$

因此，由于 ZVS 消除了与频率相关的导通损耗，因此可以更自由地增大开关频率，从而实现减小设计尺寸的目标。

4 GaN 在有源钳位反激式中的价值

下一个讨论要点强调了 GaN 在 ACF 中的价值主张。实现 ZVS 所需的能量可通过 [方程式 5](#) 进行解释。

$$E_{ZVS} = \frac{1}{2}L_M \times I_M^2 - \geq \frac{1}{2}C_p \times V_{ds}^2 \quad (5)$$

从 [方程式 5](#) 可明显看出，硅器件的更大器件电容需要更多的能量用于 ZVS。因此，这需要更长的 Q2 导通时间，从而降低开关频率并增加初级峰值电流。更高的峰值电流和更长的导通时间相结合会导致 RMS 电流增加，这些电流在 Q1 和变压器绕组中表现为传导损耗。在许多情况下，产生的这些传导损耗可以完全抵消 ACF 的其他优势，例如零钳位损耗和 ZVS。因此，与 Si 相比，GaN 具有更低的输出电容，是保持较低 RMS 电流的关键因素，因此在 ACF 拓扑中非常有用。图 4-1 中显示了对基于 GaN 和基于硅的 ACF 级的 RMS 电流进行的实证比较。

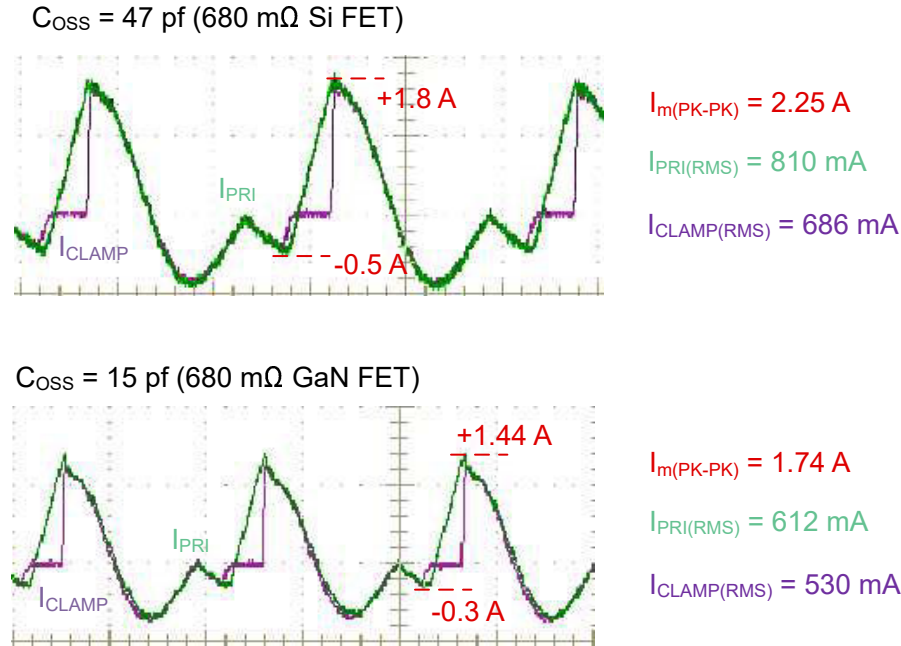


图 4-1. 使用硅 FET 与 GaN FET 的 ACF 级的电流波形

硅 FET 的更高输出电容需要更多的负磁化电流并产生更高的峰值电流，与 GaN 相比，这会导致更大的 $I_{rms}^2 R$ 损耗。

因此，ACF 可以在高频开关的同时降低功率损耗，但仅限在 RMS 电流得到管理的条件下。总之，ACF 可实现高效率和高频运行，而 GaN 可成功实现 ACF。

5 利用集成 GaN 简化 ACF 级

本应用手册分析了基于 GaN 的 ACF 如何解决散热和能量存储方面的难题，从而为小尺寸设计提供方便。但是，下一个挑战是管理实际实施，同时考虑成本和集成。图 5-1 显示了支持此拓扑的功率级所需的主要元件。

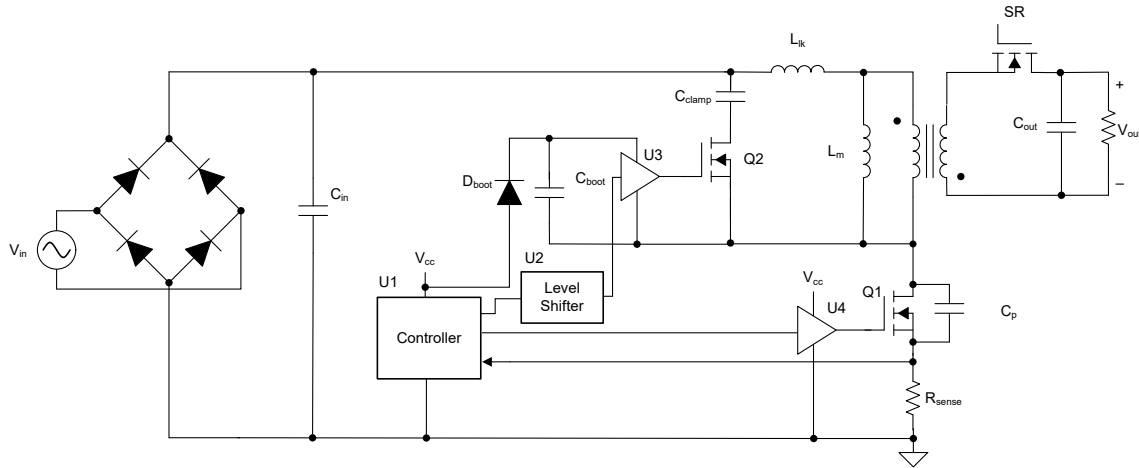


图 5-1. ACF 的实际实施

除了控制器，功率级初级侧所需的半导体器件包括高侧和低侧 FET、高侧和低侧栅极驱动器、高侧电平转换器和自举二极管。所有器件连同偏置电阻器和旁路电容器都可能会无谓地增加成本、BOM 数量和总体布板空间。

为了解决所有这些器件的复杂性，LMG2610 通过将所有器件集成到一个 7mm × 9mm 封装中来简化功率级。

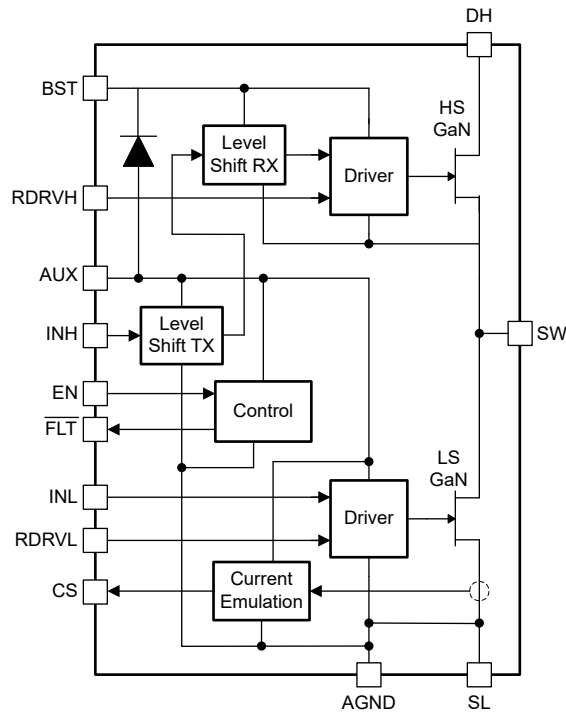


图 5-2. LMG2610 方框图

如图 5-2 所示，LMG2610 集成了 170mΩ/248mΩ GaN 半桥、栅极驱动器、电平转换器和自举二极管。该器件可支持高达 75W 的 ACF 设计。

除了集成外，LMG2610 的一个主要特性是电流检测仿真，该特性可进一步降低 ACF 设计中的功率损耗。所有电流模式控制器都会检测流经低侧 FET 的电流，以控制器件的导通时间。但是，LMG2610 不必通过传统的检测电阻器检测实际 FET 电流，而是通过 CS 引脚输出低侧 FET 电流的降压副本 (1mA/A)。然后，将复制的电流信号馈送到电阻器中，并产生控制器所需的与传统电流检测方案产生的电压相同的电压。这里的不同之处在于，功率损耗是传统检测方案的一小部分，如方程式 6 所示。

$$\frac{P_{sense,emulation}}{P_{sense:traditional}} = \frac{.001I_{LS,avg} \times 1.5V_{aux}}{I_{LS,rms}^2 \times R_{sense}} \quad (6)$$

将此功能与 ZVS 和零钳位损耗结合使用可实现出色的 ACF 效率。

与分立式设计相比，将 LMG2610 集成 GaN 半桥与 UCC28782 ACF 控制器配合使用可提供简单且具有成本效益的解决方案。这种组合可实现高频运行，在所有负载电平下都具有高效率、低待机功耗以及在高输入电压下减少 EMI 信号。与图 5-1 相比，由于 LMG2610 提供集成功能，因此图 5-3 要简单得多。

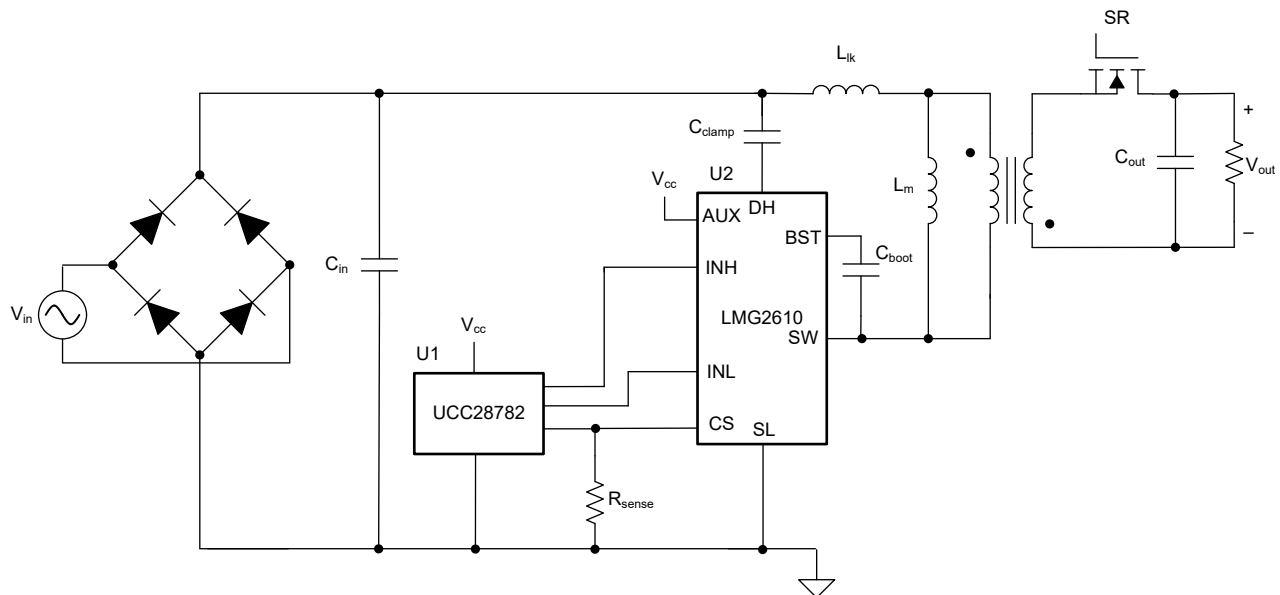


图 5-3. 具有 UCC28782 控制器和 LMG2610 集成 GaN 半桥的 ACF 功率级

6 使用 LMG2610 集成半桥和 UCC28782 ACF 控制器的物理设计实现方案

将这两个器件组合在一起可实现小尺寸和高效率性能，这可在本节介绍的两种设计中看到。

6.1 UCC28782EVM-030

第一个设计是 65W USB-C PD 适配器，具有如下规格（表 6-1 中所示）。

表 6-1. UCC28782EVM-030 规格

应用	USB-C PD 适配器
输入电压	85 - 265 Vac
输出	20V/3.25A、15V/3A、9V/3A、5V/3A
最大功率	65W

UCC28782EVM-030 能够实现的功率密度为 $30 \frac{W}{in^3}$ 或 $1.83 \frac{W}{cc}$ 。图 6-1 中显示了 UCC28782EVM-030 的紧凑外形。

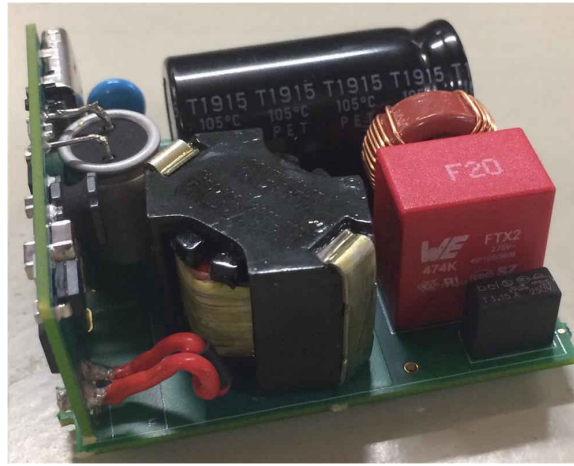


图 6-1. 采用高密度配置的 UCC28782EVM-030

这种小尺寸是通过以大约 240kHz 的最大开关频率运行实现的，这种开关频率可满足更小的电感要求，从而减小变压器磁芯尺寸。

图 6-2 中显示了整个输入电压下的满载效率。

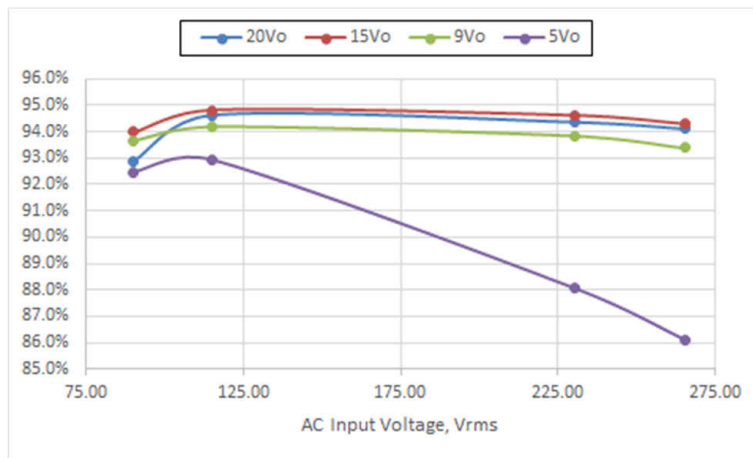


图 6-2. UCC28782EVM-030 在各种负载下的效率

如图所示，该设计超出了 CoC 和 DoE 效率要求。此外，115VAC 输入时的待机功耗至少保持为 48mW，230VAC 输入时的待机功耗至少保持为 58mW。这是通过 LMG2610 和 UCC28782 的待机工作模式实现的。

30 分钟后满载条件下捕获的热性能如下图所示。

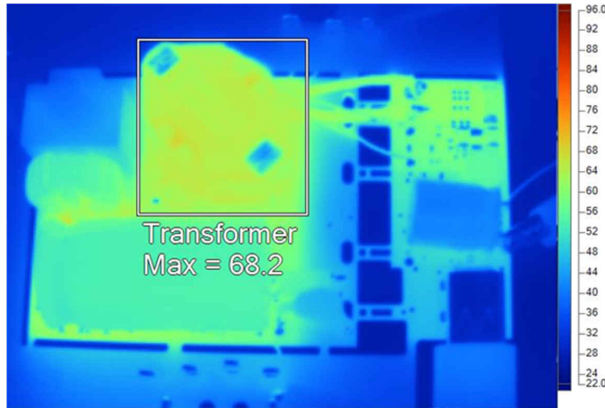


图 6-3. $V_{in} = 115V_{ac}$ 顶面

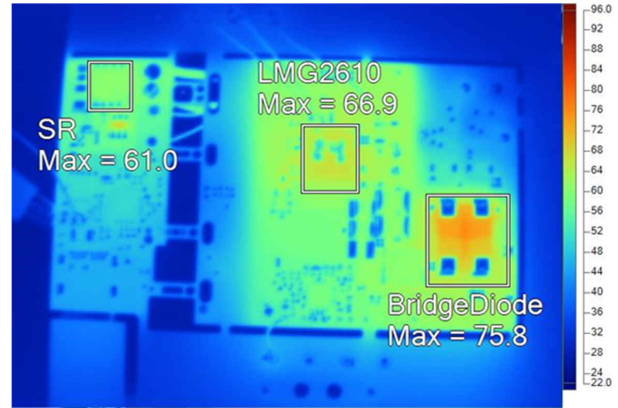


图 6-4. $V_{in} = 115V_{ac}$ 底面



图 6-5. $V_{in} = 230V_{ac}$ 顶面

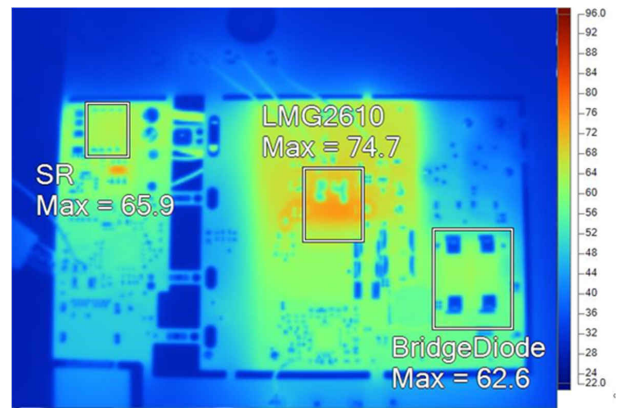


图 6-6. $V_{in} = 230V_{ac}$ 底面

在整个电路板上管理温度，以实现可靠的热运行。这是通过之前讨论的节能机制（例如 ZVS、零钳位损耗和电流检测仿真）实现的。

总之，该设计通过成功管理热性能和高频切换来实现小外形尺寸目标。

6.2 PMP23146

第二个设计是用于服务器应用的 45W 辅助电源，具有如下规格（表 6-2 中所示）。

表 6-2. PMP23146 规格

应用	服务器辅助电源
输入电压	250-410Vdc
输出	12 V/3.7 A
最大功率	45W

PMP23146 可实现惊人的功率密度 $60 \frac{W}{in^3}$ or $3.7 \frac{W}{cc}$ 。图 6-7 展示了时尚外形。

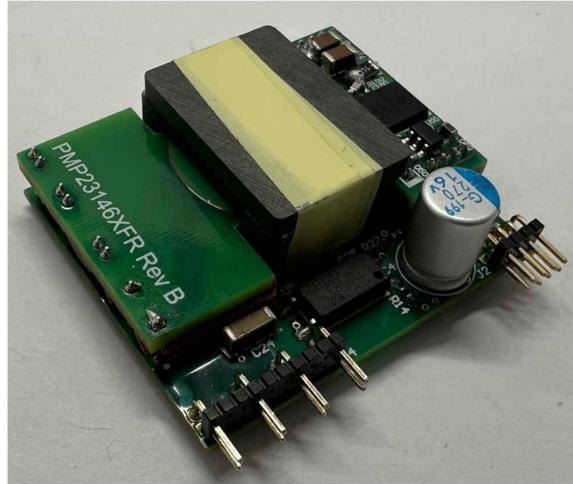


图 6-7. PMP23146 服务器辅助电源参考设计

此尺寸是通过在 400kHz 开关频率下使用平面变压器实现的。平面变压器通过在 PCB 的多层中实现绕组来显著降低整体高度。高开关频率大大降低了储能要求。

此外，LMG2610 提供的集成可减少所需的总布板空间，如图 6-8 所示。LMG2610 采用 7mm × 9mm 小型封装，与分立式设计相比，可显著减小电路板尺寸。这种集成可显著提高小型化设计的功率密度

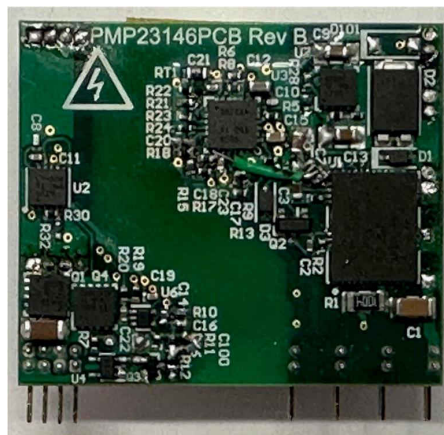


图 6-8. PMP23146 背面

图 6-10 显示了多个输入电压电平下的效率。

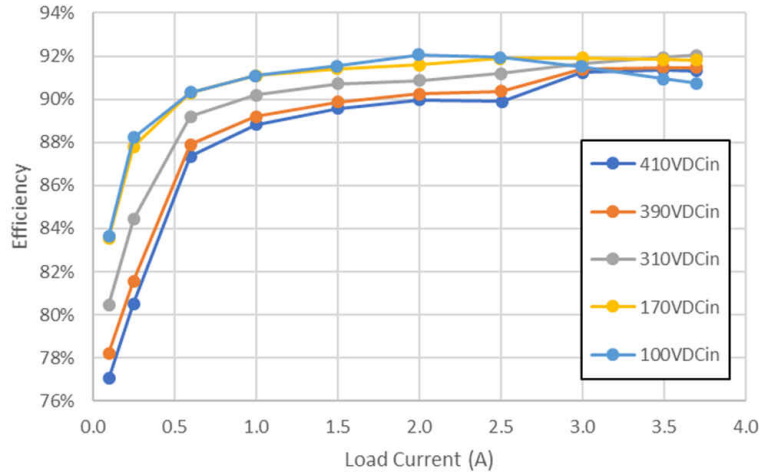
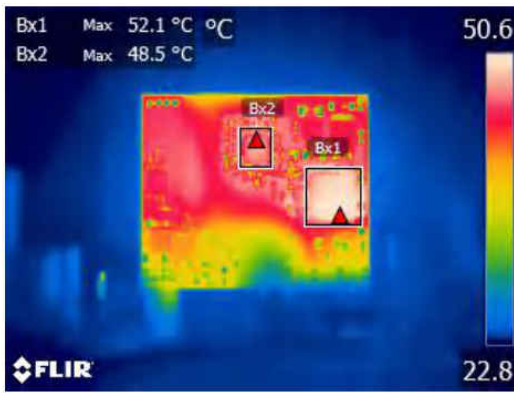


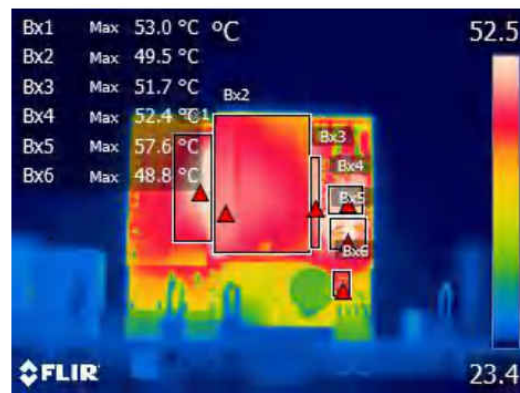
图 6-9. PMP23126 在各种负载下的效率

此外，待机功耗保持在 100mW 以下。

图 6-10 显示了满载条件下 390VDC 输入时捕获的热性能。使用强制通风时风扇电流限制为 200mA。



Thermal Image Full Load (GaN-Side of Assembly)



Thermal Image Full Load (Transformer-Side of Assembly)

图 6-10. PMP23126 热感图像

本设计对温度进行了管理，以实现可靠的热运行。

总之，此电源设计的小型化是通过 ACF、LMG2610 和 UCC28782 的组合实现的。

7 利用适用于 ACF 的设计工具

本应用手册讨论了如何通过使用 TI 的集成 GaN 技术来满足更高的功率需求和小巧的外形。为了便于进行下一个 ACF 设计，请参阅 [ACF 功率级设计计算器](#) 和 [LMG2610 SIMPLIS 模型](#)。在选择主功率级元件和对转换器运行进行初始评估时，这些工具可简化设计过程。

8 总结

实施小型化设计取决于管理热量和降低储能要求的可行性。通过使用采用 GaN 技术的高频有源钳位反激式拓扑，可以应对这些挑战。此外，通过与 LMG2610 提供的集成以及 UCC28782 提供的控制功能，此实现得以简化。经证明，ACF、LMG2610 和 UCC28782 提供的性能可在高频运行时实现高效率，从而实现小型设计。

9 参考文献

- 德州仪器 (TI), [基于 GaN 和硅 FET 的有源钳位反激式转换器的比较](#) 电源设计研讨会。
- 德州仪器 (TI), [使用 UCC28782EVM-030 65W USB-C PD 高密度有源钳位反激式转换器](#) 用户指南。
- 德州仪器 (TI), [采用 GaN 的 45W 服务器辅助电源高功率密度有源钳位反激式参考设计](#) 测试报告。
- 德州仪器 (TI), [ACF 功率级设计计算器](#)
- 德州仪器 (TI), [LMG2610 用于有源钳位反激式转换器的集成 650V GaN 半桥](#) 数据表。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司