



AI 数据中心和电信应用的电源技术对比

为什么 SiC 是理想选择

AI 数据中心和电信应用的电源技术对比

为什么 SiC 是理想选择

随着 5G 网络的到来，全球将展开新一轮大规模建设，需要大量高质量的电信整流器来提供所需的电源。为了提升能效并降低运营成本和物料单成本，WBG (宽禁带) 解决方案再次受到重视。在服务器电源方面，业界也在努力开发更高能效、更低热损耗的解决方案。支撑数字经济、大数据、物联网 (IoT) 和人工智能 (AI) 的超大规模[数据中心](#)，现已采用功率超过 30 kW 的服务器机架，并配备先进的散热管理系统。

5G 网络采用更大规模的天线阵列 (最多 64 发射 / 64 接收)，实现比以前快 100 至 1000 倍的高速数据传输，并支持数以万亿计的物联网设备。如此看来，电力消耗似乎会大幅上升。尽管单个基站的功耗已通过多项技术改进而降低，但显而易见的是，所需的基站数量会大幅增加。为了适应复杂的电源管理策略，这些基站的电源必须在待机到满负载的整个工作范围内，满足越来越严格的能效要求。

新型 SiC FET 使得此前无法实现的能效目标成为可能。本文将介绍主要的拓扑结构和器件能力，并讨论[硅超级结 MOSFET](#)、[SiC 共源共栅 JFET \(CJFET\)](#) 和 GaN FET 在该领域的竞争格局和未来走向。

基础知识

这些电源的共同点是都有一个功率因数校正 (PFC) 部分，以接近 1 的功率因数将 AC 整流为 DC，输出电压为 400 V，然后由一个 DC-DC 转换器将此 400 V 电压转换为 48 V 或 12 V 电压供系统内部使用。之后，再通过负载点转换器为 CPU 和内存模块供电。

如果分析数据中心服务器电源的使用情况，就会发现，它们在寿命周期内的大部分时间都处于轻载到中等负载状态。因此，PFC 和 DC-DC 部分必须在所有负载条件下保持高能效运行，同时满足峰值负载运行的热约束。适用于计算机电源的著名 80plus 标准就体现了这一要求，如图 1 所示。服务器必须符合钛金标准，即使在 10% 负载下也要保持高能效。图 2 所示为开放计算项目的典型规范，其中规定 3.3 kW 级电源须达到 Titanium+ (超越钛金级) 要求。

80 Plus 测试类型 ^[4]	115 V 内部非冗余				230 V 内部冗余				230 V EU 内部非冗余			
额定负载百分比	10%	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
80 Plus		80%	80%	80%						82%	85%	82%
80 Plus 铜牌		82%	85%	82%		81%	85%	81%		85%	88%	85%
80 Plus 银牌		85%	88%	85%		85%	89%	85%		87%	90%	87%
80 Plus 金牌		87%	90%	87%		88%	92%	88%		90%	92%	89%
80 Plus 白金牌		90%	92%	89%		90%	94%	91%		92%	94%	90%
80 Plus 钛金牌	90%	92%	94%	90%	90%	94%	96%	91%	90%	94%	96%	94%

图 1. 用于测试计算机电源的 80 Plus 标准

电源机械尺寸:	65 mm x 165 mm x 529.5 mm (高 x 宽 x 深)
交流输入范围 (额定):	200 V _{AC} 至 277 V _{AC}
输出:	12.6 V _{DC} /265 A (压降) 52.5 V _{DC} /5 A (输出精度 0.2%)
能效:	Titanium+ (超越钛金级) 能效 (230 V _{AC} , 风扇由内部电源供电, 含连接器损耗) 10% 负载时为 90% 20% 负载时为 94% 50% 负载时为 96% 100% 负载时为 91%
保持时间:	100% 负载时为 20 ms (最坏情况)
共享:	20% 以上负载时为 ±5% 100% 负载时为 ±1%
冗余:	12.6 V _{DC} 的输出 ORing 器件 支持热插拔
通信:	RS485-Modbus PSU 输出 PSU 和 BBU 之间采用 SMBus 电源之间采用 CANbus
保护:	OCP、OTP、OVP、UVP、BBU 保护信号
LED:	绿色/琥珀色双色 LED 表示电源正常/备用 红色 LED 表示故障

图 2. 开放计算项目的数据中心服务器电源标准 (80 Plus 钛金牌)

图 3 显示了一个典型电源架构, 其中包括 EMI 滤波器、输入桥式整流器、带有 650 V / 750 V FET 和 SiC JBS (结-势垒-肖特基) 二极管的简单双通道交错式升压转换器 (PFC) 以及用于 DC-DC 转换器的全桥 LLC 级。PFC 级的典型开关频率为 65–150 kHz。这里, 为了满足功率密度需求并在低频下实现更高的能效, 在两者之间进行了权衡, 因为若开关频率从 30 kHz 提升至 150 kHz, 则电感器可以显著缩小。基于此, 采用硅超级结 MOSFET 并搭配 SiC JBS 二极管, 可以确保在 65 至 150 kHz 的硬开关条件下依然保持高能效。高度先进的硅超级结 MOSFET 支持快速开关, 而 SiC 肖特基二极管有助于尽可能降低 MOSFET 中的 Eon 损耗。

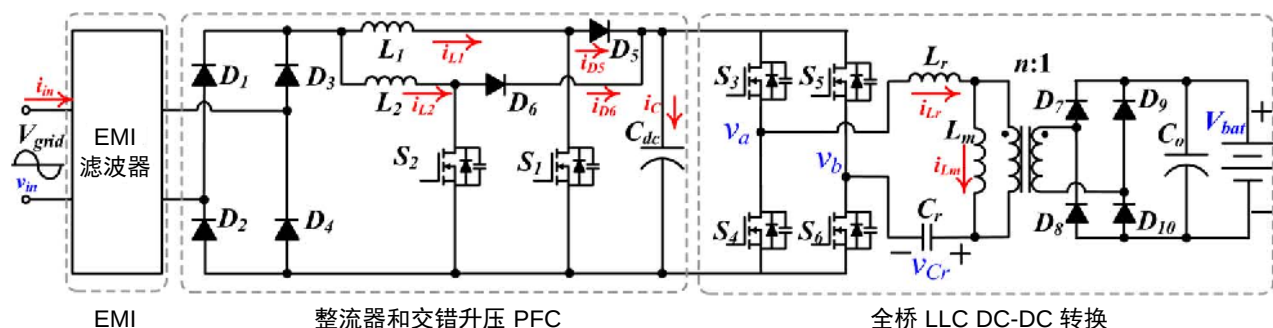


图 3. 数据中心电源典型架构

在电路的 LLC 部分，650 V MOSFET 也很常用。电路保持 ZVS (零电压开关) 运行状态，并降低了关断电流，因此损耗要低得多。此外，电路可以在 100–500 kHz 频率下工作，因而变压器可以做得更小。次级侧采用超低导通电阻的 80–150 V 硅 MOSFET，对高频次级交流电压进行整流，以提供稳定的输出直流电压。选择使用 650 V FET，以便在某些工作条件下丢失 ZVS 时，体二极管的恢复不会造成破坏。

半导体器件

就晶体管而言，在 PFC 和 DC-DC 单元的高压侧，通常将 650 V / 750 V 等级器件用于 48 V 和 12 V 架构。

表 1 比较了采用常用 TO247 封装的一些业界同等产品。硅超级结 (Si SJ) 器件和安森美 SiC CJFET 可由 0 至 10 V 驱动器驱动。SiC MOS 方案需要不同的电压 (例如 –4 V 至 18 V)。所有 SiC 器件的栅极电荷均较低，并且二极管恢复电荷 Q_{rr} 大大降低。硅超级结和 SiC CJFET 的体二极管导通损耗低于 SiC MOSFET。

表 1. 采用 TO247 封装的类似器件的比较

参数	单位	SCT3017AL	UF4C075016K3S	SCTW100N65G2AG	IPW65R019C7
技术		SiC MOS	SiC CJFET	SiC MOS	Si SJ
V _{ds} max	V	650	750	650	650
V _{gs} max	V	–4 至 22	–20 至 20	–10 至 22	–20 至 20
I _d 100°C	A	49	50?	70	62
R _{th} JC max	°C/W	0.35	0.34	0.42	0.28
R _{ds}	mΩ	17	16	20	17
R _{ds} 125	mΩ	22.4	22	26	34
R _{ds} 175	mΩ	27	36	32	45
R _G	Ω	4	4.5	2	0.85
C _{iss} 400 V	pF	2884	1500	3315	10000
C _{oss} 400 V	pF	148	?	267	170
C _{rss} 400 V	pF	65	?	46	27
C _{oss} (er)	pF	397	?	?	338

表 1. 采用 TO247 封装的类似器件的比较 (续)

参数	单位	SCT3017AL	UF4C075016K3S	SCTW100N65G2AG	IPW65R019C7
Coss(tr)	pF	?	?	?	3320
Eoss(400 V)	μJ	34	?	?	13.2
Qg	nC	172 (18 V)	43 (12 V)	162 (18 V)	210 (10 V)
Vsd	V	3.2	1.3	3.5	0.9
Qrr (400 V, 150C)	V	?	?	370? 需要热插拔	20000

表 2 显示了采用 DFN8x8 封装的类似器件的比较。Si SJ、SiC CJFET 和 GaN 器件均可由标准硅栅极驱动器驱动。安森美 SiC CJFET 的导通电阻非常低。为了比较具有不同 150C Rds(on) 的器件，最好使用底部三行中的品质因数。WBG 解决方案提供更好的品质因数，尤其是 Rds*Coss(tr) 和 Rds*Qrr。

表 2. 采用 DFN8X8 封装的类似器件的比较

参数	单位	IPL65R070C7	STL57N65M5	TP65H070LDG	UF3SC065030-D8S	UF3SC065040-D8S
技术		Si-SJ	Si-SJ	GaN	SiC CJFET	SiC CJFET
Id	A	20	22	16	20	20
Vdsmax	V	650	650	650	650	650
RthJC	°C/W	0.74	0.66	1.3	0.47	0.64
Eas	mJ	171	960	NA	120	76
Rds(25C)	mΩ	62	61	72	27	42
Rds(150C)	mΩ	140	134	150	43	78
Rg	Ω	0.85	1.4		4.5	4.5
Ciss	pF	3020	4200	600	1500	1500
Coss(er)	pF	100	97	131	230	146
Coss(tr)	pF	1110	344	217	520	325
Qrr	nC	10000	9500	89	280	137
Rds*Coss(er)	mΩ.pF	14900	12998	19650	9890	11388
Rds*Coss(tr)	mΩ.pF	165390	46096	32550	22360	25350
Rds*Qrr	mΩ.nC	1490000	1273000	13350	12040	10686

图 4 显示了 SiC、GaN 和硅超级结 FET 常用配置的横截面架构。GaN HEMT 器件中的电流为横向流动，而其他类型器件中的电流为垂流动。垂直电流设计使得高压器件能够以更紧凑的方式实现，原因在于其源极和漏极位于晶圆的相对两侧，而非都置于顶部表面。在 GaN HEMT 中，电流传导被限制在 2DEG 沟道中，而 SiC 器件使用短表面沟道，但主要利用体材料来承载电流。SiC JFET 具有体沟道，结合其垂直结构，使得单位面积漏源导通电阻 (RdsA) 最低，从而能够实现最小的芯片尺寸。它可以与低压 Si MOSFET (增加 10% 的电阻) 进行共源共栅连接，形成 SiC CJFET。

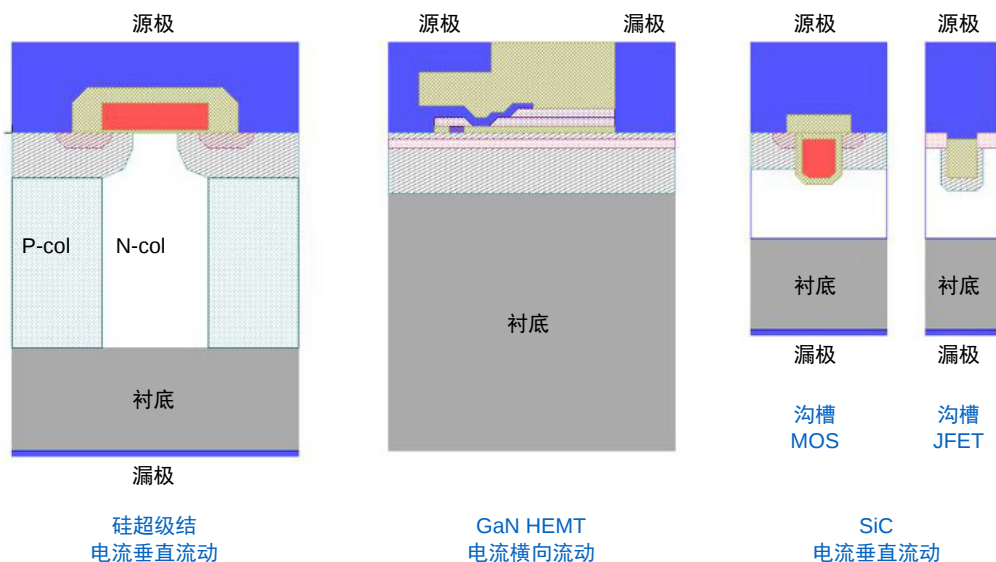


图 4. 硅超级结、GaN HEMT 和 SiC CJFET 器件的架构

随着器件不断改进，最终的开关速度极限由对器件 C_{oss} 充电的负载电流决定。对于给定的导通电阻， $C_{oss}(tr)$ 值越低，转换速率越快，达到 400 V 的延迟时间越短。很明显，SiC CJFET 在这方面表现出色，是高频功率转换的理想选择。

所有 WBG 方案在 Q_{rr} 方面的性能都显著优于超级结硅器件。因此，在需要硬开关导通的电路中，如连续电流模式 (CCM) 图腾柱 PFC，WBG 器件是更优的选择。如果这些电路在续流状态下使用体二极管传导电流，体二极管的导通状态压降会引起导通损耗。因此，一般采用同步传导方式，通过接通 FET 沟道来降低损耗。检测到电流反向与 FET 沟道导通之间通常存在一个延迟；在高频应用中，此延迟时间会占据开关周期的很大一部分。例如，如果开关频率为 100 kHz (10 μ s 周期)，则 100 ns 的死区时间对二极管导通的影响微乎其微。但如果开关频率为 1 MHz (100 ns 开关周期)，死区时间占比将是 10%。因此，低体二极管 VFSD 和低 Q_{rr} 是非常有用的特性，而 SiC CJFET 在这方面表现出色。

此外，最高效的电路方案会避免硬开关导通，因为虽然 WBG 器件的关断损耗可以忽略不计，但导通损耗并非如此。现有的 CJFET 具备低栅极电荷、低导通电阻和低关断损耗等特性，使得软开关电路的工作频率可以提升 5-10 倍。

在器件稳健性方面，所有 SiC CJFET 都具有出色的雪崩承受能力，能够增强转换器的系统可靠性。尽管芯片尺寸较小，但其性能通常优于超级结 FET，尤其是在高电流水平下。GaN 器件无法处理雪崩效应，因此在设计时会采用高击穿电压以避免该工作区间。

栅极驱动注意事项

SiC CJFET 的一个关键优势是简化了低压 MOSFET 的栅极驱动。其 V_{th} 为 5 V， V_{gsmax} 额定值为 ± 20 V。它可以像硅超级结 MOSFET 一样，在 0 至 10 V 或 0 至 12 V 范围内驱动。图 5 比较了不同技术的推荐栅极驱动电压和栅极绝对最大额定值。SiC MOSFET 通常采用负和正栅极驱动，需要 20 至 25 V 的栅极电压总摆幅。栅极电压往往非常接近绝对最大额定值，因此必须特别注意栅极尖峰。在高频下，大栅极摆幅会带来相当大的栅极电荷损耗。

此外，为了解决 V_{th} 迟滞问题，必须严格遵循制造商关于栅极驱动电压水平的建议。SiC CJFET 在这方面非常灵活，而且可以使用与硅功率开关兼容的栅极电压进行驱动。

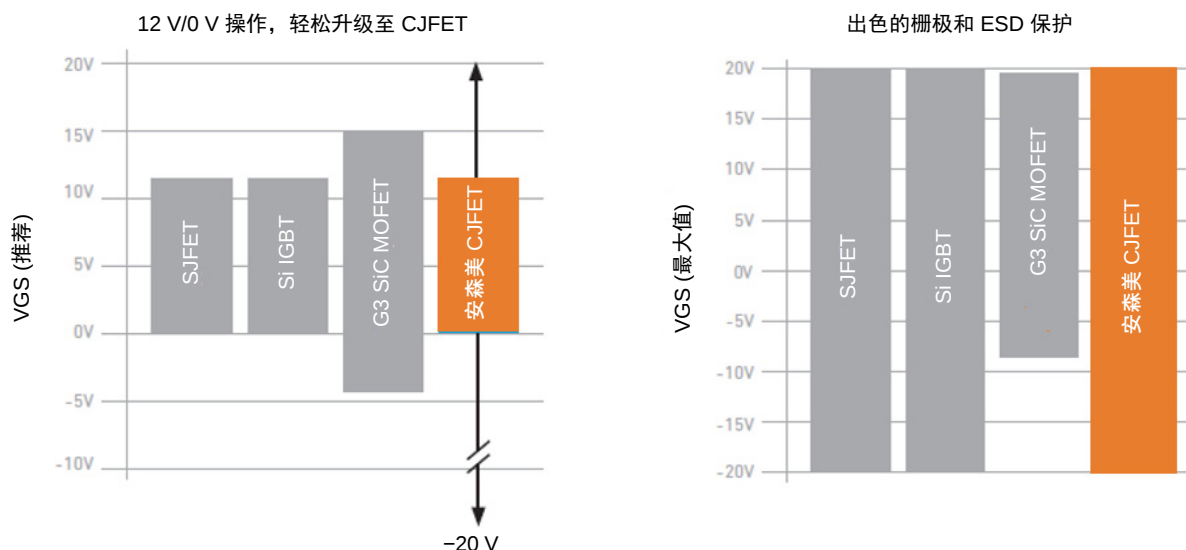


图 5. 不同功率器件技术的栅极驱动电压和绝对最大额定电压建议值的比较

GaN 增强型器件一般具有较低的 V_{th} ，并且在较窄的栅极电压范围内进行驱动，通常非常接近绝对最大 VGS 限值。为此，需要专门的驱动器和精心的布局，以避免损坏开关。共源共栅方案可以规避其中的一些难点。较低的栅极电压摆幅有利于降低较高频率下的栅极损耗。

无论何种情况，当器件以较高速度工作时，要让器件在高 dV/dt 下保持关断会变得愈发困难。对电源环路和栅极驱动环路电感引发的栅极电压尖峰的管理也是如此。引入带有源极开尔文引脚的封装会有所帮助，但本文后续部分将讨论其他方案。

电路拓扑 – PFC 级

图 6 显示了图腾柱 PFC (TPPFC) 电路，以及在 1.5 kW 的安森美演示板上以 100 kHz 测得的能效。该电路消除了所有二极管导通损耗，包括输入二极管桥和 SiC PFC 二极管的损耗。在这种情况下，转换器以 CCM 模式运行，器件采用硬开关。显然，图腾柱 PFC 的损耗大大降低，因而可以实现钛金级能效目标。

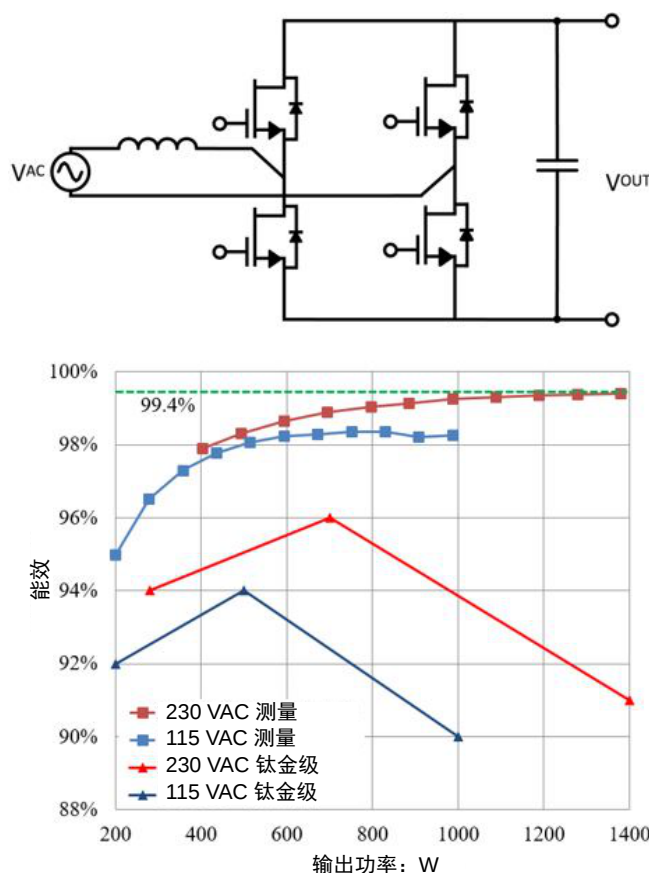


图 6. 图腾柱 PFC 电路的能效

采用 SiC CJFET 可以在不牺牲能效的情况下实现非常高的功率密度，不过控制和磁元件的设计更为复杂。有一种不需要检测电流交越的替代方法，它利用额外的辅助开关来实现导通时的零电压转换。通过使用谐振技术 (如辅助谐振换流极 (ARCP)) 来消除导通和关断损耗，可以获得类似或更好的结果。然而，对于更先进的技术而言，其成本效益似乎在远高于 5 kW 的功率水平下更具优势。

电路拓扑：DC-DC 级

由于输出电压固定，全桥 LLC 转换器具有出色的功率密度和能效，目前已成为高功率应用领域的主流方案。随着功率水平降低，可以使用半桥 LLC 方案。通常使用 100–500 kHz 范围内的频率，并且鉴于 12 V 输出端的电流水平较高，降低损耗的关键实际上已转移到变压器次级和低压次级 MOSFET。

对于高压 FET，为使 V_{DS} 从关断状态变为二极管导通状态，需要对输出电容充电，而为了快速完成充电操作， $C_{OSS(TR)}$ 必须非常低。但这样一来，用户必须尽量缩短 FET 开启同步导通前的死区时间，以降低体二极管导通所产生的损耗。导通状态下的低 R_{ds} 可有效降低导通损耗，大多数超级结和 WBG 开关的低 E_{OFF} 则有助于将损耗保持在最低水平。

在轻载条件下，如果 ZVS 丢失，则可能会发生二极管硬恢复。采用 SiC CJFET 等 WBG 开关时，这不会带来任何风险，但硅超级结 MOSFET 可能会受损。为了尽量降低这种可能性，通常使用快速恢复型超级结 (FET)，但 SiC CJFET 不需要采取这样的预防措施。

近期展望

虽然硅超级结 FET 仍在不断改进，但未来几年，SiC 和 GaN 器件的改进幅度将远远超越硅基器件。除了 R_{dsA} 每 2-3 年改善 30-50% 之外，封装技术也有望取得长足进步。当前亟待解决的主要挑战是降低电感，并在小型表面贴装方案中实现更高效的散热。一种可能的途径是迁移到用于直接表面贴装或作为 PCB 中嵌入元件的半桥元件。由此可以简化 PCB 布局，并支持实现较低电感的功率和栅极环路。

另一种正在发展的途径是将驱动器与功率器件集成，形成单驱动器 + 开关电路或半桥元件(观看[此](#)网络研讨会，了解有关将栅极驱动器与 [EliteSiC](#) FET 配合使用的更多信息)。鉴于大多数 SiC 和 GaN 器件需要独特的驱动电压水平和电路，共封装或集成产品可以有效降低复杂性，方便用户使用。此外，每个器件都能因此得到更好的利用，潜力得以充分发挥。这无疑将进一步节省系统成本和功率损耗，并推动 WBG 的普及。

本系列之前的文章曾介绍过集成半桥栅极驱动器的 SIP 半桥，它采用 35 m Ω 、1200 V SiC CJFET。目前，不同供应商正纷纷推出表面贴装方案，这一趋势有望进一步加速。

650 V 宽禁带开关的成本正快速下降。安森美的 650 V / 750 V CJFET 预计将在未来两年内实现与传统器件的成本持平。加上易于使用的特性，这一趋势预计将大大加快 WBG 器件在[数据中心服务器](#)和[电信](#)电源应用中的部署。

修订历史

修订	变更说明	日期
0	文档初版发布	6/12/2025
1	新增中文版	7/11/2025

All brand names and product names appearing in this document are registered trademarks or trademarks of their respective holders.

onsemi, **Onsemi**, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marketing.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales