

# 于48 V-12 V功率转换 采用eGaN® FET的优势



宜普电源转换公司 Suvankar Biswas, David Reusch, and Edward A. Jones

当今的数据中心[1]的供电架构正处于从既有的12 V朝着48 V几架移转的过渡时期,提升48 V供电架构的电源转换效率及功率密度变得更为重要。应对业界的需求,采用氮化镓场效应晶体管(eGaN FET)的DC/DC转换器可以实现高效及高功率密度的解决方案。此外,在采用48 V功率系统的油电混合汽车、混合动力汽车及插电式混合动力汽车面世后,可进一步发挥氮化镓晶体管的优点,包括缩小尺寸、更轻盈及更低的材料清单成本[2]。本应用笔记展示出采用eGaN FET的48 V-12 V已调节型的非隔离式中间总线转换器,其优化系统如何可以实现更高的功率密度及效率。我们也会详细分析,与传统硅基解决方案相比,基于eGaN FET的多电平转换器拓扑如何可以进一步发挥eGaN FET的优势。

如果在48 V应用需要实现更高的性能[1、3-4],有多种不同拓扑可选:从硬开关[5-8]至高度谐振[9-12];从已调节型至非调节型,及从隔离型至非隔离型。图1展示出不同的拓扑,在输入电压为12 V时,其效率与功率密度的关系。谐振式及采用软开关的转换器可提供最高的效率及功率密度,但可选的调节及输入电压范围的灵活性最低。由于小型化的氮化镓晶体管大大缩小了占板面积,需要多很多的有源元件的拓扑(从而缩小无源元件的占板面积)变得受欢迎,因为无源元件是阻碍提升功率密度的主要壁垒。开关电容电路是优异拓扑的范例,这些拓扑可有效地减少或去除无源元件[13-19]。同样地,具开关谐振式回路电流的转换器也变得受欢迎[20、21]。

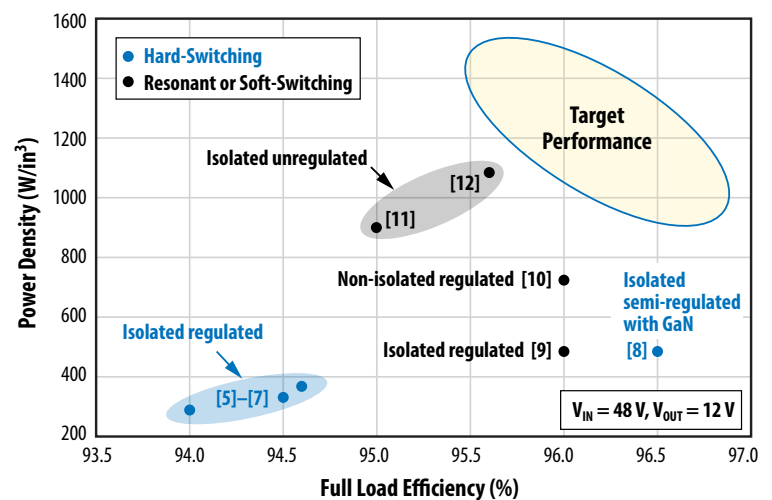


图1: 在较早前研调发布的、在48 V-12 V功率转换,比较最先进的商用产品的满载效率及功率密度。

### 阻碍提高功率密度的壁垒

传统降压转换器的感应器尺寸是提升功率密度的壁垒。在之前12 V输入的负载点设计, 我们记录了氮化镓器件可提高开关频率及缩小无源元件的尺寸[22, 23]。对于48 V转换来说, 电压提高了4倍, 所以与开关相关的转换损耗也增加了大约4倍, 而输出电容的开通损耗则增加了16倍。当48 V使用传统功率半导体, 其所需的更高阻隔电压会使得品质因数变差, 因此需要采用更好的半导体。从图2 (a) 可以看到, 与最先进的硅基MOSFET相比, 100 V的eGaN FET的开关品质因数的参数小4倍。从图2 (b) 可以看到, 采

用相同的电感器、具相同导通阻抗、基于硅MOSFET与基于eGaN FET的48 V-12 V降压转换器的电路性能的比较。在高频时, 基于eGaN FET的转换器的优势非常明显。

### 选用不同的电感器对性能及功率密度的影响

针对基于eGaN FET的48 V降压转换器, 我们把9个不同系列、从4个供应商所提供的40个不同电感器进行优化。根据电感器的相对体积, 图3 (a) [24] 展示出3个具备最优越性能的电感器, 电感器的体积及频率对性能的影响。可以看到, 电感器越小型化, 功率

转换器的最高频率可以更高及总损耗也会更高。这是因为开关损耗与频率成正比关系, 而电感磁芯损耗与频率成反比关系。更高频率导致相对地更低的系统损耗, 同时在 $\Delta f_{sw}$ ,  $\Delta P_{inductor}$ 会大于 $\Delta P_{device_{sw}}$ 。当电感器越小型化, 对于转换器来说, 电感器的损耗相对地更大, 从而会提高最高频率及最低损耗点。Vishay公司的 #4 IHLPL-5050EZ-01 系列具3.3  $\mu$ H电感, 其效率及功率密度的折冲良好。图3(b)展示了在开关频率为500 kHz时的系统损耗。

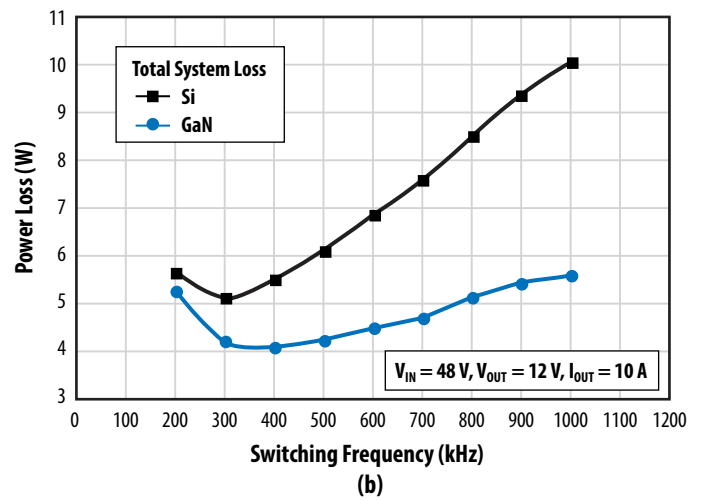
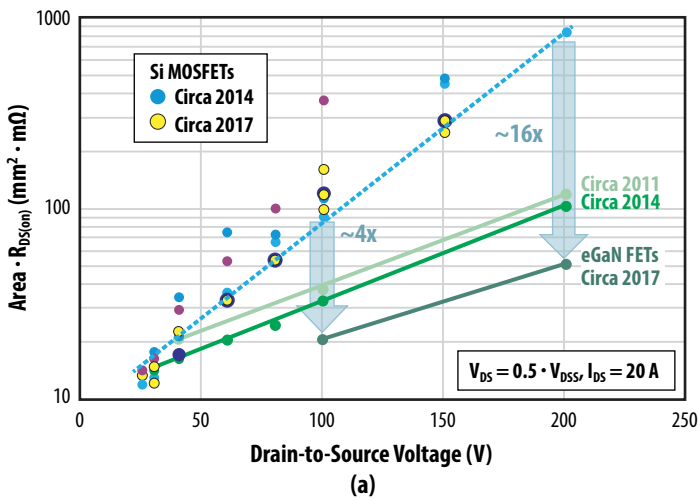
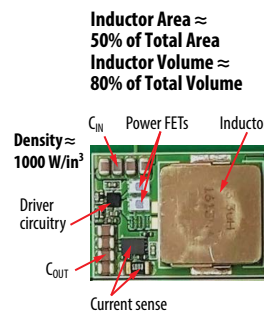
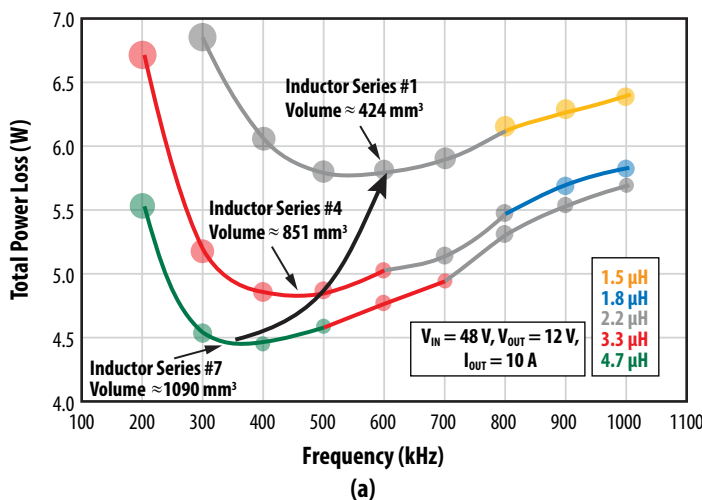


图2: (a) 电压为30 V至200 V的氮化镓与硅基器件的品质因数的比较; 及 (b) 针对采用100 V的EPC2045氮化镓晶体管及100 V硅基MOSFET的转换器, 频率对功率损耗的实验性测量结果比较。



Inductor Area ≈ 50% of Total Area  
Inductor Volume ≈ 80% of Total Volume

Density ≈ 1000 W/in<sup>3</sup>

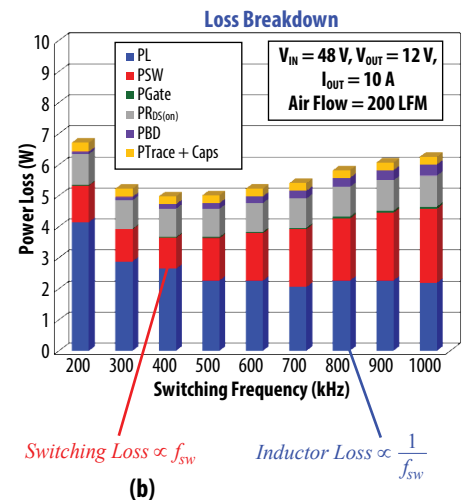


图3: (a) 针对基于氮化镓晶体管的48 V<sub>IN</sub>-12 V<sub>OUT</sub>非隔离型IBC, 频率及电感对IBC效率的实验性测量结果比较, 3个电感系列具不同体积, 而点的体积与电感纹波电流成正比关系。 (b) 48 V<sub>IN</sub>-12 V<sub>OUT</sub>非隔离型IBC的功率损耗, 其电感系列为Vishay IHLPL-5050EZ-01, L是3.3  $\mu$ H, 采用EPC2045功率器件、栅极驱动器是LMG1205。

图3(b)展示出本应用笔记描述的基于100 V EPC2045 eGaN FET [24]的非隔离型IBC, 可实现超过1000 W/in<sup>3</sup>的功率密度。图4(a)展示五相原型, 图4(b)展示当原型工作在满载的条件下, 它的热成像。

采用驱动能力更强的栅极驱动器[25]并改善电流检测, 其最优开关频率将得以提高。采用更小型化的电感器(2.2 μH), 例如Vishay

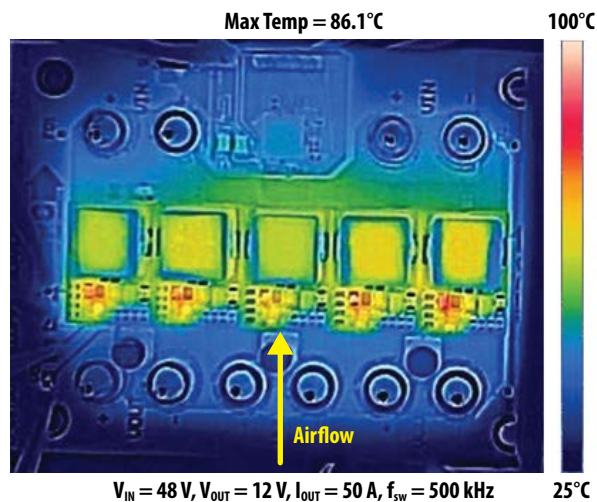
公司的#1 IHLP-4040DZ-01系列, 可实现超过1400 W/in<sup>3</sup>的功率密度及效率可以接近96%, 如图5(a)所示。图5(b)展示出EPC9205开发板, 13.5毫米 x 22毫米 x 4.8毫米的原型及采用EPC2045 eGaN FET。

我们把基于硅MOSFET的设计与EPC9205原型作出比较。基于硅MOSFET的设计使用较早前描述的同优化程序。硅原型选用了

Vishay公司的IHLP-5050FD-01系列、开关频率为300 kHz及最大的5.6 μH电感器。图6(a)展示出硅原型的电气性能比较。在图6(b), 我们把基于eGaN FET的原型EPC9130及EPC9205的满载效率, 与之前提及到的最先进48 V-12 V DC/DC功率转换器进行比较。该两个图表确认基于eGaN FET的原型可实现更高的效率。

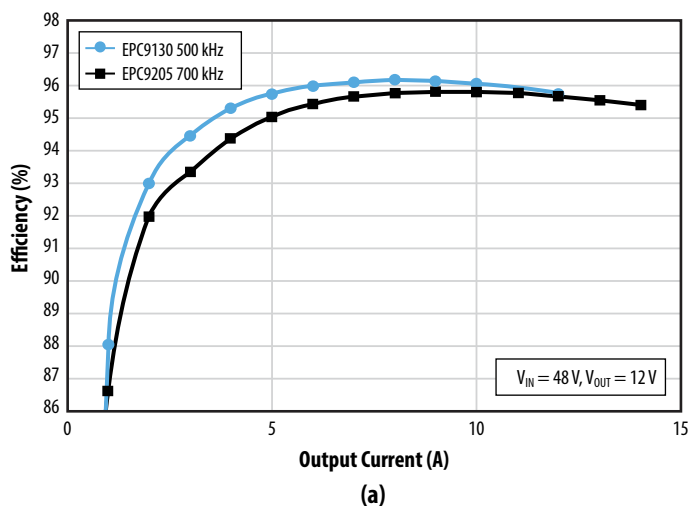


(a)

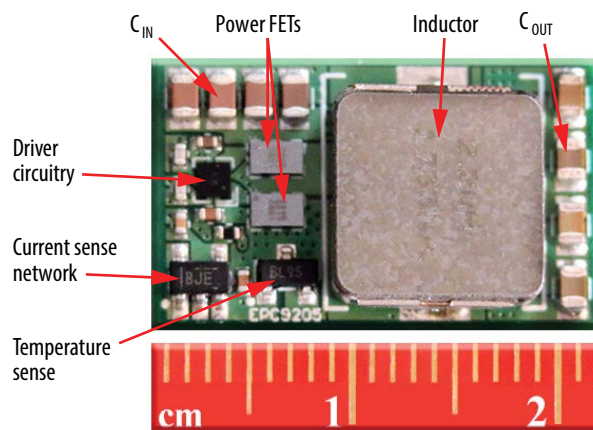


(b)

图4: (a) EPC9130五相48 V-12 V原型及 (b) 这个原型的热成像。工作条件是400 LFM (2 m/s) 强制对流、环境温度是25°C及稳态热。

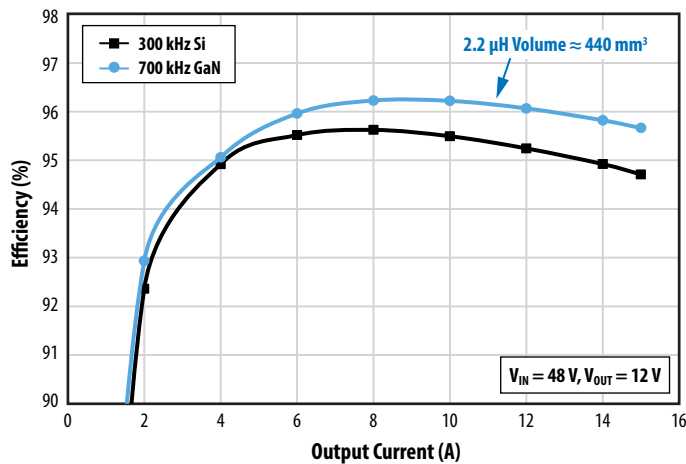


(a)

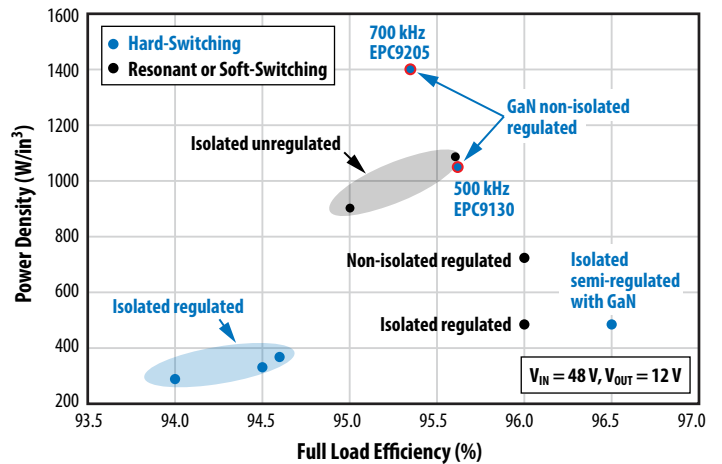


(b)

图5: (a)工作在500 kHz频率的EPC9130及700 kHz频率的EPC9205原型的效率曲线, 估计电感器的损耗, 及 (b) EPC9205原型可实现1400 W/in<sup>3</sup> 功率密度。



(a)



(b)

图6: (a) EPC9205与硅原型, 在48 V<sub>IN</sub>-12 V<sub>OUT</sub> 转换时的电气性能的实验结果的比较, 及 (b) EPC9130及EPC9205与最先进的商用产品及之前研究发布的48 V-12 V功率转换, 在电气性能及功率密度方面作出比较。

### 采用多级拓扑进一步提升性能

之前提及多级拓扑缩小电感器。电感器的尺寸是提高功率密度的壁垒。从数量上来说:

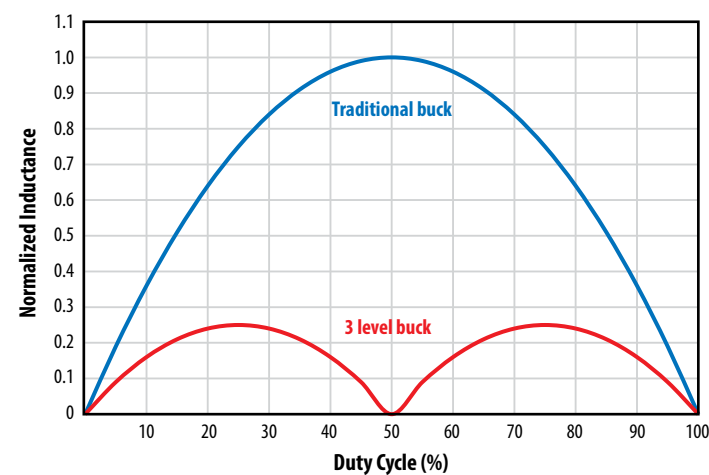
$$L_{Buck} = \frac{V_{IN}(1-D)D}{\Delta I_L f_{sw}} \quad (1)$$

$$L_{3-level} = \frac{V_{IN}(0.5-D)D}{\Delta I_L f_{sw}}, D < 0.5 \quad (2)$$

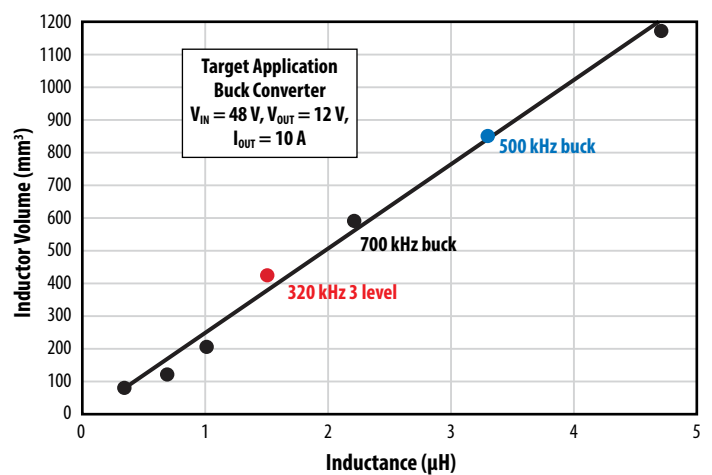
$$L_{3-level} = \frac{V_{IN}(D-0.5)(1-D)}{\Delta I_L f_{sw}}, D > 0.5 \quad (3)$$

其中V<sub>IN</sub> 是输入电压、D是占空比、f<sub>sw</sub>是开关频率、ΔI<sub>L</sub>是电感纹波电流峰-峰值。图7(a) 绘出这些公式所得的结果, 我们可以清楚看到, 采用3级拓扑, 可以在整个占空比范围内, 实现更小型化的电感器, 而50%占空比

为采用传统开关电容电路所需的工作条件。图7(b)展示出小型化的电感与之前讨论过的EPC9130(工作在500 kHz频率)及EPC9205(工作在700 kHz频率)原型作出比较。



(a)



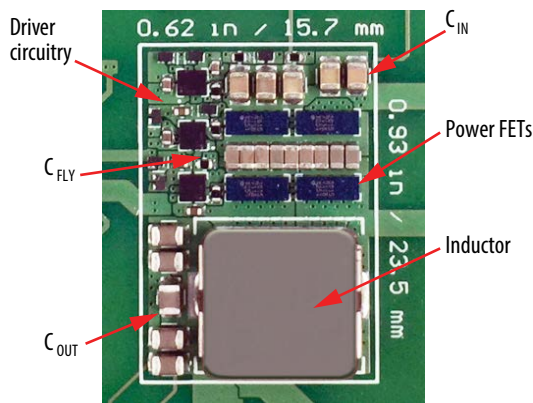
(b)

图7: (a)在三级降压转换器的更小型化的电感器, 及 (b)与EPC9130及EPC9205的比较。

除了电感更小型化外,多级拓扑也可以降低有效电压应力。在三级拓扑采用具有较低的额定电压的器件使得半导体的损耗更低,因为具有较低的额定电压的器件具

有更低的品质因数(FOM)。相比硅器件,采用氮化镓晶体管会使得这个优势更为明显[25]。图8(a)展示出采用EPC2015C的40 V eGaN FET的三级原型。图8(b)展示与

EPC9205的效率的比较,我们清楚看到,基于eGaN FET的多级解决方案可以实现高性能及高功率密度。图8(a)展示的原型可以实现高达2000 W/in<sup>3</sup>的功率密度。



(a)

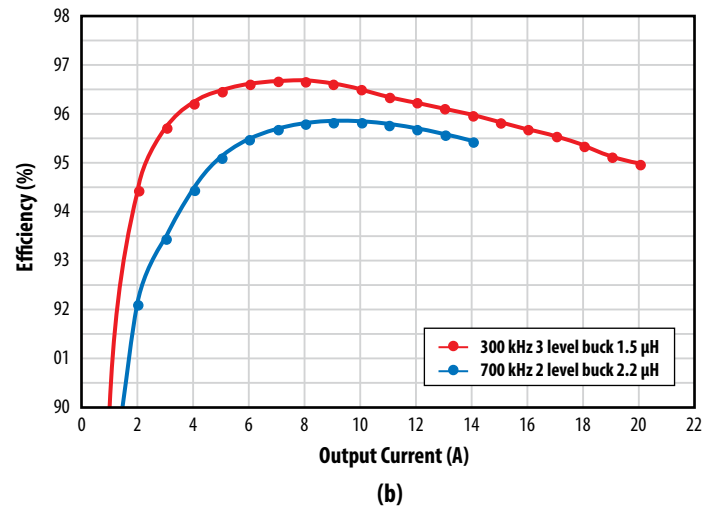


图8:(a)采用EPC2015C的40 V eGaN FET的三级原型,及  
(b)与EPC9205的效率的比较。

## 总结

本应用笔记分析面向发展迅猛的各种48 V功率转换应用中,尤其是数据中心的电源分配及车载应用,eGaN FET被证明为具备更快速的开关、更高效及更小型化等优势半导体。这些应用需要极高的性能及功率密度。我们分析了相比传统的硅器件,采用优越的eGaN FET半导体的优势,从而实现优越的电气性能。此外,在典型的48 V - 12 V功率转换系统,我们优化了电感的选择过程,及展示出采用eGaN FET可实现更小型化及更高效的设计。已调节型转换器的多相降压原型(EPC9130)及优化了尺寸的降压原型(EPC9205)被证明为可实现很高的效率(约96%)及高功率密度(超过1000 W/in<sup>3</sup>),超越了其它的基于硅器件的转换器的性能。如果采用多级拓扑,效率可以更高—接近97%,而功率密度可以接近2000 W/in<sup>3</sup>。

## 参考资料

1. X. Li and S. Jiang, "Google 48V Power Architecture," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Plenary. [Online] <https://www.apec-conf.org/Portals/0/APEC%202017%20Files/Plenary/APEC%20Plenary%20Google.pdf?ver=2017-04-24-091315-930&timestamp=1495563027516>
2. <https://www.delphi.com/innovations/48-volt-mild-hybrid#>
3. L. Tung, "Google, Facebook pause rivalries: Here's their 48V power-saving rack spec for Open Compute Project," ZDNET, August 2016. <http://www.zdnet.com/article/google-facebook-pause-rivalries-heres-their-48v-power-saving-rack-spec-for-open-compute-project/>
4. S Taranovich, "Data center next generation power supply solutions for improved efficiency," EDN network, April, 2016.
5. Ericsson PKB 4204B PI datasheet. [Online] [www.ericsson.com](http://www.ericsson.com)
6. General Electric EBDW025A0B datasheet. [Online] [www.geindustrial.com](http://www.geindustrial.com)
7. Ericsson BMR457 datasheet. [Online] [www.ericsson.com](http://www.ericsson.com)
8. J. Glaser, J. Strydom, and D. Reusch, "High Power Fully Regulated Eighth-brick DC-DC Converter with GaN FETs," International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe), 2015, pp. 406-413.
9. Delta Electronics E54SJ12040 datasheet. [www.deltaww.com](http://www.deltaww.com)
10. Vicor PI3546-00-LGIZ evaluation board. [Online] [www.vicorpower.com](http://www.vicorpower.com)
11. D. Reusch, "High Frequency, High Power Density Integrated Point of Load and Bus Converters", PhD Dissertation, Virginia Tech, 2012.
12. Vicor BCM48Bx120y300A00 datasheet. [Online] [www.vicorpower.com](http://www.vicorpower.com)
13. T. A. Meynard and H. Foch, "Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters," Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE, Toledo, pp. 397-403, 1992, vol.1
14. Y. Lei, C. Barth, S. Qin, W.-C. Liu, I. Moon, A. Stillwell, D. Chou, T. Foulkes, Z. Ye, Z. Liao and R.C.N. Pilawa-Podgurski, "A 2 kW, Single-Phase, 7-Level, GaN Inverter with an Active Energy Buffer Achieving 216 W/in<sup>3</sup> Power Density and 97.6% Peak Efficiency", IEEE Applied Power Electronics Conference, Long Beach, CA, 2016.

## 参考资料 (承上页)

15. V. Yousefzadeh, E. Alarcon, and D. Maksimovic, "Three-level buck converter for envelope tracking applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 2, pp. 549-552, March 2006.
16. D. Reusch, F. C. Lee, and M. Xu, "Three level buck converter with control and soft startup," in 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Sept 2009, pp. 31-35.
17. J. S. Rentmeister and J. T. Stauth, "A 48V: 2V flying capacitor multilevel converter using current-limit control for flying capacitor balance," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 367-372.
18. A. Stillwell, Robert C. N. Pilawa-Podgurski, "A 5-level flying capacitor multi-level converter with integrated auxiliary power supply and start-up," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 2932-2938.
19. Z. Ye, Y. Lei, W. c. Liu, P. S. Shenoy and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "Design and implementation of a low-cost and compact floating gate drive power circuit for GaN-based flying capacitor multi-level converters," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, 2017, pp. 2925-2931.
20. Y. Li, X. Lyu, D. Cao, S. Jiang and C. Nan, "A high efficiency resonant switched-capacitor converter for data center," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 4460-4466.
21. S. Jiang, C. Nan, X. Li, C. Chung and M. Yazdani, "Switched tank converters," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018, pp. 81-90.
22. S. Ji, D. Reusch, and F. C. Lee, "High Frequency High Power Density 3D Integrated Gallium Nitride Based Point of Load Module," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4267-4273, 2012.
23. H. Umeda, Y. Kinoshita, S. Ujita, T. Morita, S. Tamura, M. Ishida and T. Ueda, "Highly Efficient Low-Voltage DC-DC Converter at 2-5 MHz with High Operating Current Using GaN Gate Injection Transistors," International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy, and Energy Management (PCIM Europe), pp. 1025-1032, 2014.
24. EPC2045 eGaN FET Datasheet. [Online] [www.epc-co.com](http://www.epc-co.com)
25. D. Reusch, S. Biswas and Y. Zhang, "System Optimization of a High-Power Density Non-Isolated Intermediate Bus Converter for 48 V Server Applications," in 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018, pp. 2191-2197.
26. EPC2015C eGaN FET Datasheet. [Online] [www.epc-co.com](http://www.epc-co.com)
27. A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, D. Reusch, GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Second Edition, Wiley, 2014.