

# 於48 V–12 V功率轉換採用eGaN® FET的優勢



宜普電源轉換公司 Suvankar Biswas, David Reusch 及 Edward A. Jones

當今的數據中心[1]的供電架構正處於從既有的12 V朝著48 V機架轉換的過渡時期，提升48 V供電架構的電源轉換效率及功率密度變得為重要。應對業界的需求，採用氮化鎵場效應電晶體 (eGaN FET) 的DC/DC轉換器可以實現高效及高功率密度的解決方案。此外，在採用48 V功率系統的油電混合汽車、混合動力汽車及插電式混合動力汽車面世後，可進一步發揮氮化鎵電晶體的優勢，包括縮小尺寸、更輕盈及更低的材料清單成本[2]。本應用筆記展示出採用eGaN FET的48 V – 12 V已調節型的非隔離式中間匯流排轉換器，其優化系統如何可以實現更高的功率密度及效率。我們也會詳細分析，與傳統矽基解決方案相比，基於eGaN FET的多階層轉換器的拓撲如何可以進一步發揮eGaN FET的優勢。

如果在48 V應用需要實現更高的性能[1、3-4]，有多種不同拓撲可選：從硬開關[5-8]至高度諧振[9-12]；從已調節型至非調節型，及從隔離型至非隔離型。圖1展示出不同的拓撲，在輸入電壓為12 V時，其效率與功率密度的關係。諧振式及採用軟開關的轉換器可提供最高的效率及功率密度，但可選的調節及輸入電壓範圍的靈活性最低。由於小型化的氮化鎵電晶體大大縮小了佔板面積，需要多很多的有源元件的拓撲（從而縮小無源元件的佔板面積）變得受歡迎，因為無源元件是阻礙提升功率密度的主要壁壘。開關電容電路是優異拓撲的範例，這些拓撲可有效地減少或去除無源元件[13-19]。同樣地，具開關諧振式回路電流的轉換器也變得受歡迎 [20、21]。

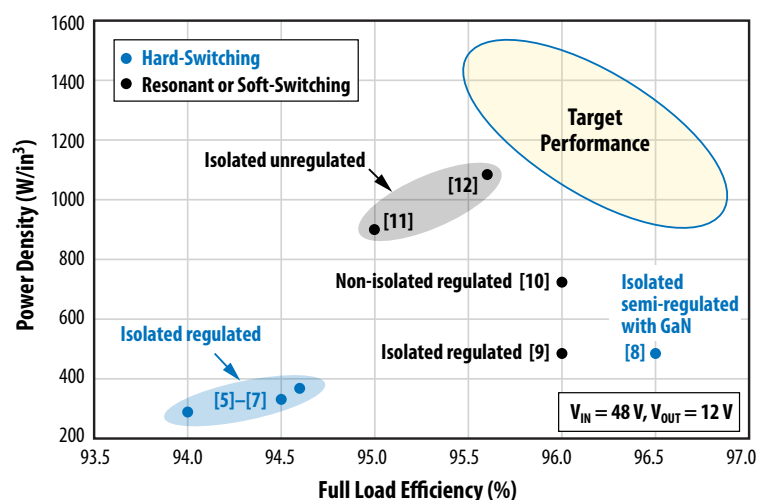
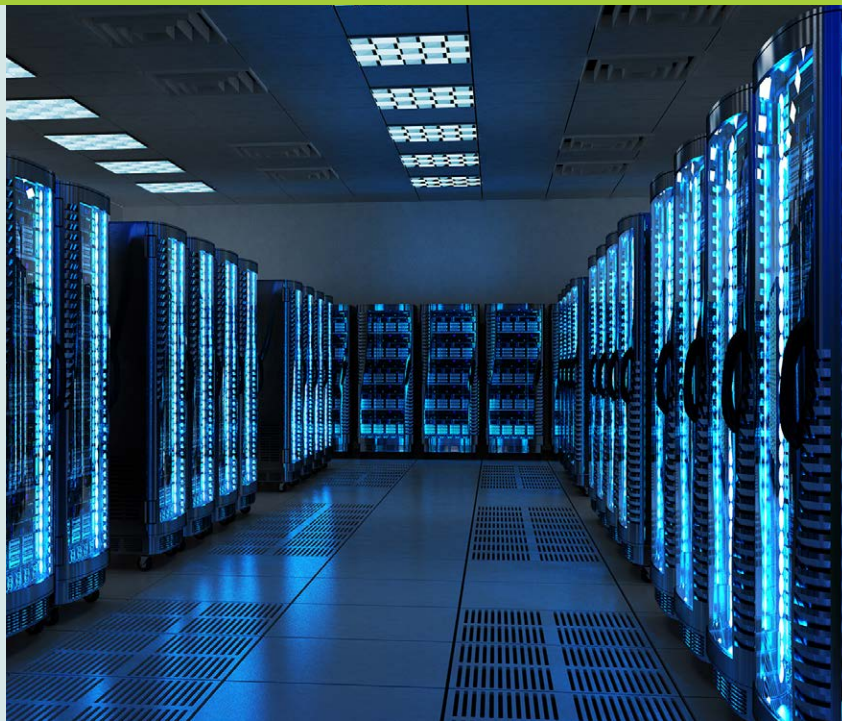


圖1：在較早前研調發佈的、在48 V – 12 V功率轉換，比較最先進的商用產品的滿載效率及功率密度。

**阻礙提高功率密度的壁壘**

傳統降壓轉換器的感應器尺寸是提升功率密度的壁壘。在之前12 V輸入的負載點設計，我們記錄了氮化鎵元件可提高開關頻率及縮小無源元件的尺寸[22、23]。對於48 V轉換來說，電壓提高了4倍，所以與開關相關的轉換損耗也增加了大約4倍，而輸出電容的開通損耗則增加了16倍。當48 V使用傳統功率半導體，其所需的更高阻隔電壓會使得品質因數變差，因此需要採用更好的半導體。從圖2 (a) 可以看到，與最先進的矽基MOSFET相比，100 V的eGaN FET的開關品質因數的參數小4倍。從圖2 (b) 可以看到，

採用相同的電感器、具相同導通阻抗、基於矽MOSFET與基於eGaN FET的48 V – 12 V降壓轉換器的電路性能的比較。在高頻時，基於eGaN FET的轉換器的優勢非常明顯。

**選用不同的電感器對性能及功率密度的影響**

針對基於eGaN FET的48 V降壓轉換器，我們把9個不同系列、從4個供應商所提供的40個不同電感器進行優化。根據電感器的相對體積，圖3 (a) [24] 展示出3個具備最優越性能的電感器，電感器的體積及頻率對性能的影響。可以看到，電感器小型化，功

率轉換器的最高頻率可以更高及總損耗也會更高。這是因為開關損耗與頻率成正比關係，而電感磁芯損耗與頻率成反比關係。更高頻率導致相對地更低的系統損耗，同時在 $\Delta f_{sw}$ ,  $\Delta P_{inductor}$  會大於  $\Delta P_{device_{sw}}$ 。當電感器越小型化，對於轉換器來說，電感器的損耗相對地更大，從而會提高最高頻率及最低損耗點。Vishay公司的 #4 IHLP-5050EZ-01系列具3.3  $\mu$ H電感，其效率及功率密度的折衷良好。圖3(b)展示了在開關頻率為500 kHz時的系統損耗。

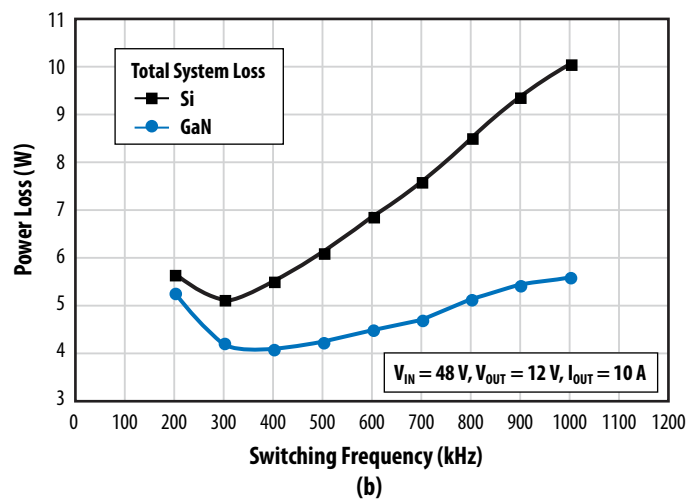
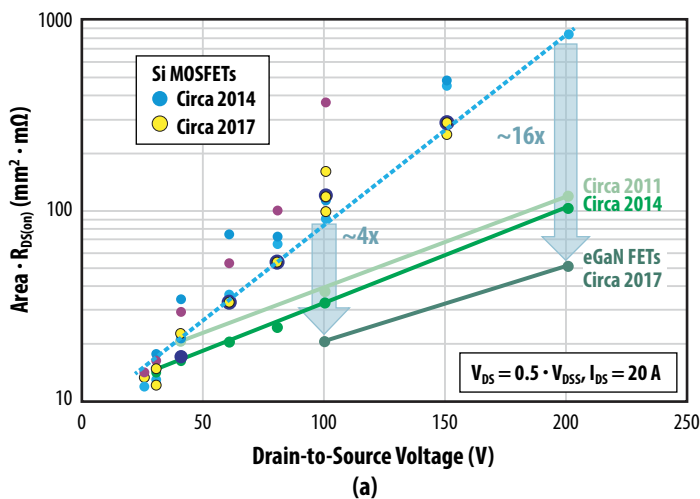


圖2: (a)電壓為30 V至200 V的氮化鎵與矽基元件的品質因數的比較及 (b)針對採用100 V的EPC2045氮化鎵電晶體及100 V矽基MOSFET的轉換器，頻率對功率損耗的實驗性測量結果的比較。

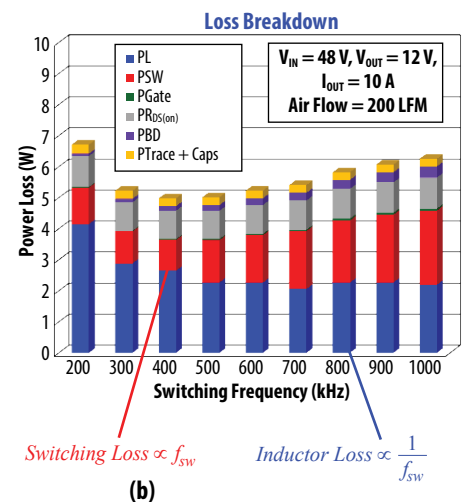
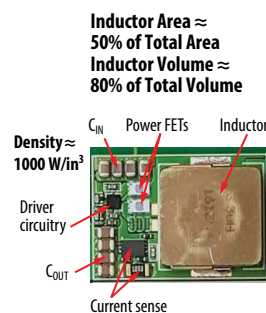
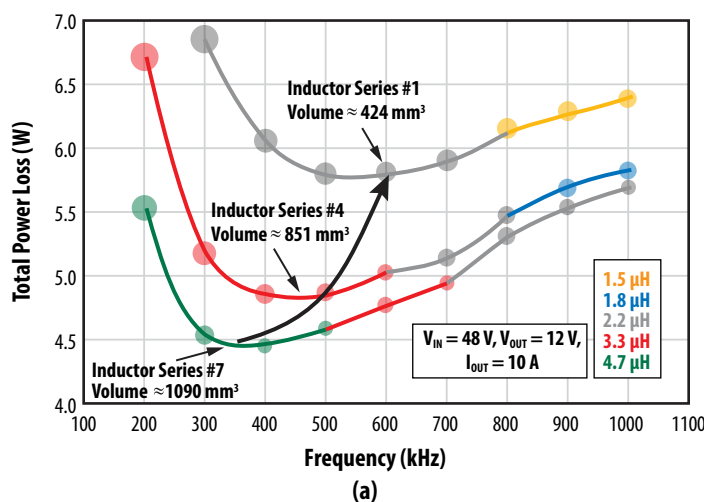


圖3: (a) 針對基於氮化鎵電晶體的48 V<sub>IN</sub> – 12 V<sub>OUT</sub>非隔離型IBC，頻率及電感對IBC效率的實驗性測量結果的比較，3個電感系列具不同體積，而點的體積與電感紋波電流成正比關係。(b) 48 V<sub>IN</sub> – 12 V<sub>OUT</sub>非隔離型IBC的功率損耗，其電感系列為Vishay IHLP-5050EZ-01、L是3.3  $\mu$ H、採用EPC2045功率器件、開極驅動器是LMG1205。

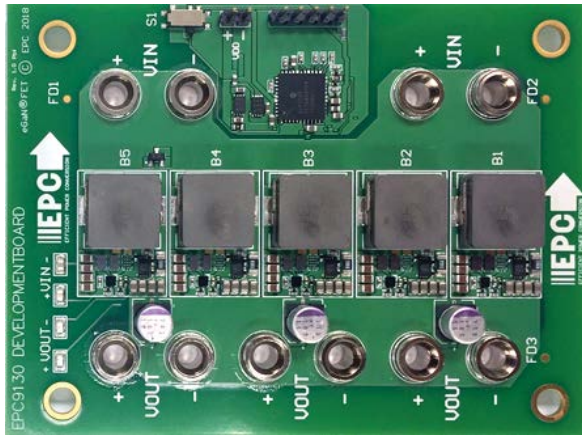
圖3(b)展示出本應用筆記描述的基於100 V EPC2045 eGaN FET [24]的非隔離型IBC，可實現超過1000 W/in<sup>3</sup>的功率密度。圖4(a)展示五相原型，圖4(b)展示當原型工作在滿載的條件下，它的熱圖像。

採用驅動能力更強的閘極驅動器[25]並改善電流檢測，其最優開關頻率將得以提高。採用更小型化的電感器(2.2 μH)，例如Vishay

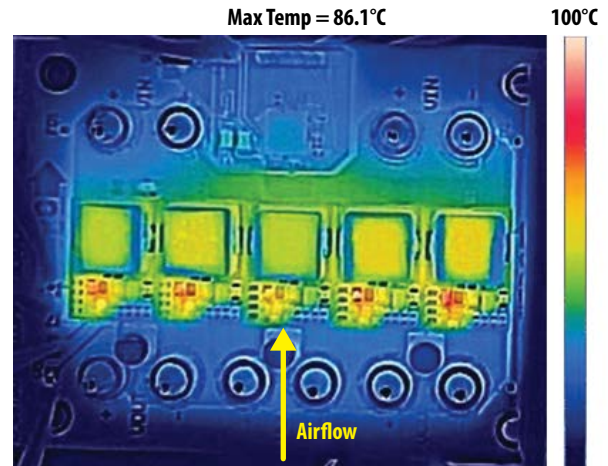
公司的#1 IHLP-4040DZ-01系列，可實現超過1400W/in<sup>3</sup>的功率密度及效率可以接近96%，如圖5(a)所示。圖5(b)展示出EPC9205開發板，13.5毫米x22毫米x4.8毫米的原型及採用EPC2045 eGaN FET。

我們把基於矽MOSFET的設計與EPC9205原型作出比較。基於矽MOSFET的設計使用較早前描述的同優化程式。矽原型選用了

Vishay公司的IHLP-5050FD-01系列、開關頻率為300 kHz及最大的5.6 μH電感器。圖6(a)展示出矽原型的電氣性能比較。在圖6(b)，我們把基於eGaN FET的原型EPC9130及EPC9205的滿載效率，與之前提及到的最先進48 V – 12 V DC/DC功率轉換器進行比較。兩個圖表確認，基於eGaN FET的原型可實現更高的效率。

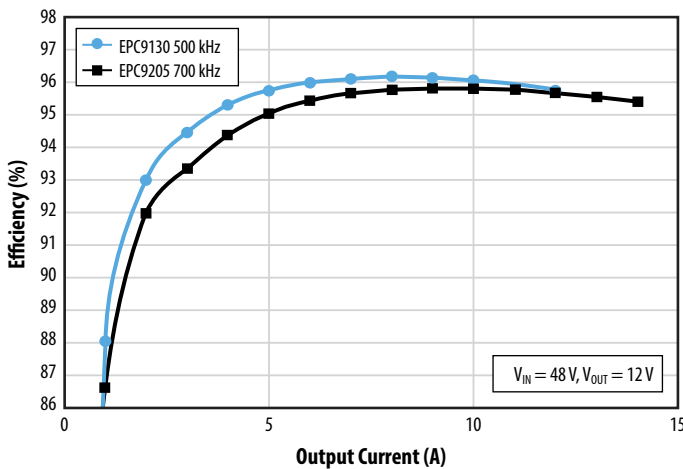


(a)

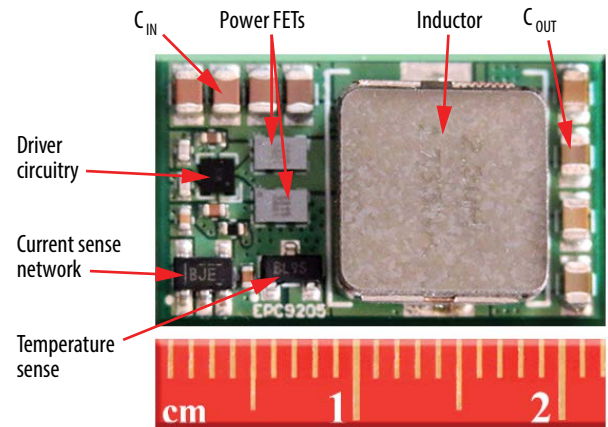


(b)

圖4: (a) EPC9130五相48 V – 12 V原型及 (b) 這個原型的熱圖像。工作條件是400 LFM (2 m/s) 強制對流、環境溫度是25°C及穩態熱。

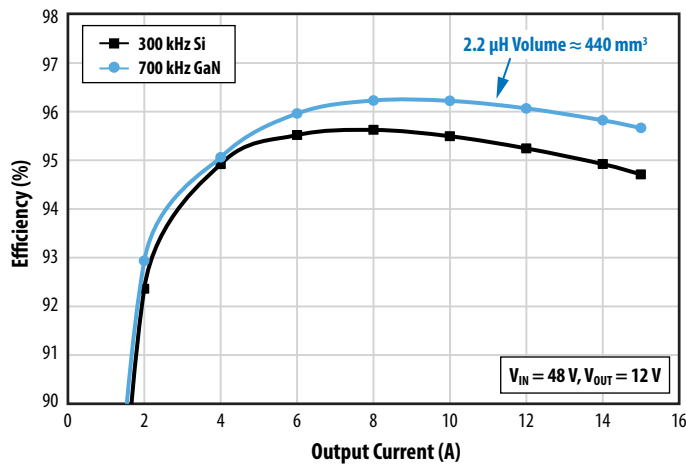


(a)

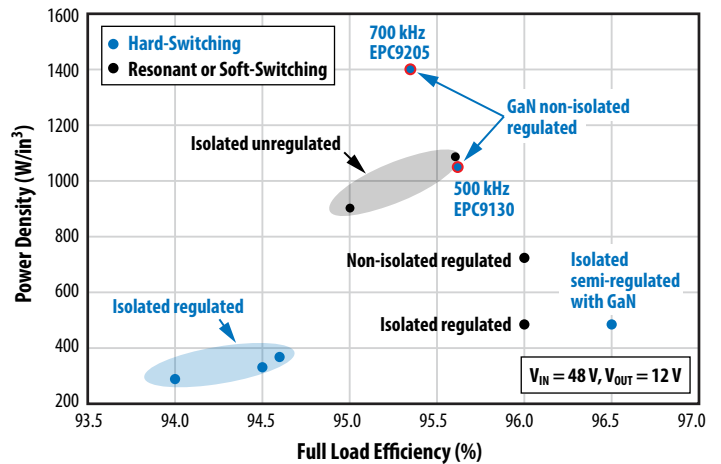


(b)

圖5: (a)工作在500 kHz頻率的EPC9130及700 kHz頻率的EPC9205原型的效率曲線，估計電感器的損耗，及 (b) EPC9205原型可實現1400 W/in<sup>3</sup> 功率密度。



(a)



(b)

圖6: (a) EPC9205與矽原型, 在48 V<sub>IN</sub> – 12 V<sub>OUT</sub> 轉換時的電氣性能的實驗結果的比較, 及 (b) EPC9130及EPC9205與最先進的商用產品及之前研究發佈的48 V – 12 V功率轉換, 在電氣性能及功率密度方面作出比較。

### 採用多階層拓撲進一步提升性能

之前提及多階層拓撲縮小電感器。電感器的尺寸是提高功率密度的壁壘。從數量上來說：

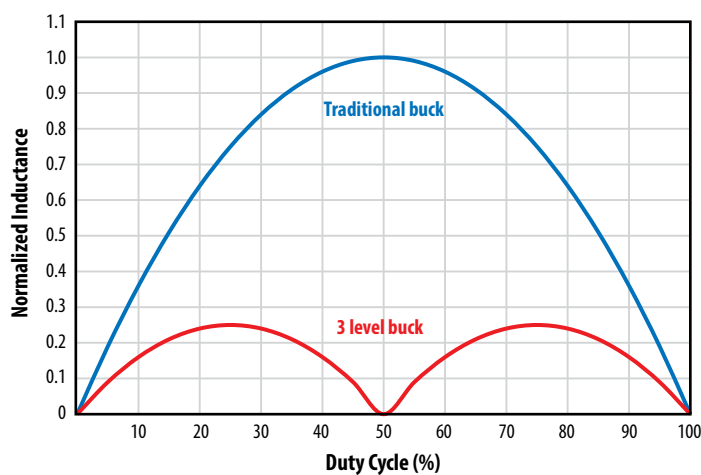
$$L_{Buck} = \frac{V_{IN}(1-D)D}{\Delta I_L f_{sw}} \quad (1)$$

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

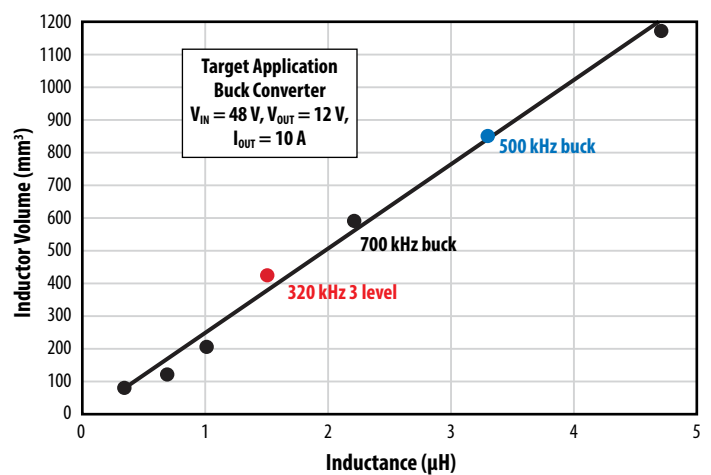
$$L_{3-level} = \frac{V_{IN}(D-0.5)(1-D)}{\Delta I_L f_{sw}}, D > 0.5 \quad (3)$$

其中V<sub>IN</sub>是輸入電壓、D是佔空比、f<sub>sw</sub>是開關頻率、ΔI<sub>L</sub>是電感紋波電流峰-峰值。圖7(a)繪出這些公式所得的結果, 我們可以清楚看到, 採用三階層拓撲, 可以在整個佔空比範圍內, 實現更小型化的電感器, 而50%佔

空則為採用傳統開關電容電路所需的工作條件。圖7(b)展示出小型化的電感與之前討論過的EPC9130 (工作在500 kHz頻率) 及EPC9205 (工作在700 kHz頻率) 原型作出比較。



(a)



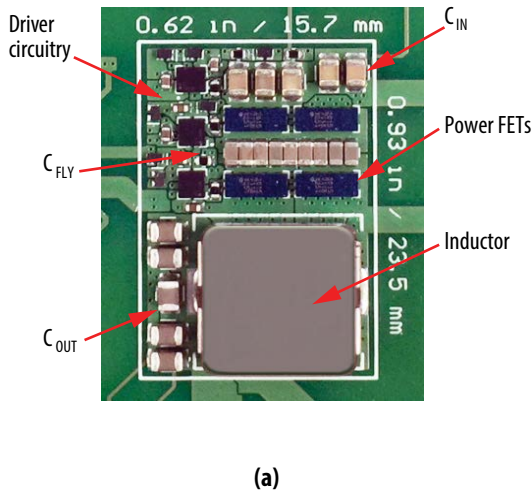
(b)

圖7: (a) 在三階層降壓轉換器的更小型化的電感器, 及 (b) 與EPC9130及EPC9205的比較。

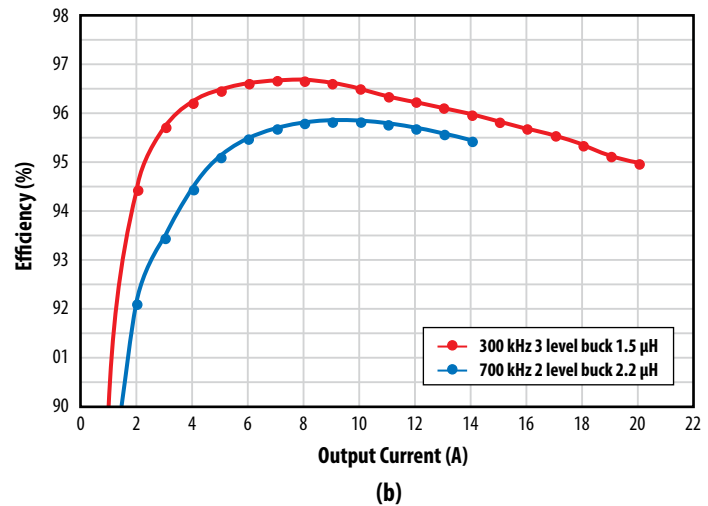
除了電感更小型化外，多階層拓撲也可以降低有效電壓應力。在三階層拓撲採用具有較低的額定電壓的元件使得半導體的損耗更低，因為具有較低的額定電壓的元件具有更

低的品質因數 (FOM)。相比矽器件，採用氮化鎵電晶體會使得這個優勢更為明顯[25]。圖8(a)展示出採用EPC2015C的40 V eGaN FET的三級原型。圖8(b)展示與EPC9205的效率的

比較，我們清楚看到，基於eGaN FET的多階層解決方案可以實現高性能及高功率密度



(a)



(b)

圖8: (a)採用EPC2015C的40 V eGaN FET的三階層原型，及(b)與EPC9205的效率的比較。

## 總結

本應用筆記分析面向發展迅猛的各種48 V功率轉換應用中，尤其是數據中心的電源分配及車載應用，eGaN FET被證明為具備更快速的開關、更高效及更小型化等優勢的半導體。這些應用需要極高的性能及功率密度。我們分析了相比傳統的矽元件，採用優越的eGaN FET半導體的優勢，從而實現優越的電氣性能。此外，在典型的48 V – 12 V功率轉換系統，我們優化了電感的選擇過程，及展示出採用eGaN FET可實現更小型化及更高效率的設計。已調節型轉換器的多相降壓原型 (EPC9130) 及優化了尺寸的降壓原型 (EPC9205) 被證明為可實現很高的效率 (約96%) 及高功率密度 (超過1000 W/in<sup>3</sup>)，超越了其他的基於矽元件的轉換器的性能。如果採用多階層拓撲，效率可以更高—接近97%，而功率密度可以接近2000 W/in<sup>3</sup>。

## 參考資料

- 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>
- <https://www.delphi.com/innovations/48-volt-mild-hybrid#>
- 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/>
- S Taranovich, "Data center next generation power supply solutions for improved efficiency," EDN network, April, 2016.
- Ericsson PKB 4204B PI datasheet. [Online] [www.ericsson.com](http://www.ericsson.com)
- General Electric EBDW025A0B datasheet. [Online] [www.geindustrial.com](http://www.geindustrial.com)
- Ericsson BMR457 datasheet. [Online] [www.ericsson.com](http://www.ericsson.com)
- 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.
- Delta Electronics E54SJ12040 datasheet. [www.deltawww.com](http://www.deltawww.com)
- Vicor PI3546-00-LGIZ evaluation board. [Online] [www.vicorpower.com](http://www.vicorpower.com)
- D. Reusch, "High Frequency, High Power Density Integrated Point of Load and Bus Converters", PhD Dissertation, Virginia Tech, 2012.
- Vicor BCM48Bx120y300A00 datasheet. [Online] [www.vicorpower.com](http://www.vicorpower.com)
- 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
- 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.

## 參考資料 (承上頁)

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.