

# 整合式氮化鎵元件實現更高 DC/DC 轉換效率及功率密度



宜普電源轉換公司 Alex Lidow、David Reusch 及 Johan Strydom

生長在矽晶體上並構建成一種增強型氮化鎵 (eGaN<sup>®</sup>) 場效應電晶體可以推動全新並讓人驚嘆的終端應用的出現，例如無線電源傳送、光學遙感技術 (Lidar) 及波峰追蹤等應用[1]。此外，由於氮化鎵場效應電晶體在性能方面取得重大進展，因此可以在目前大部份的應用替代矽基功率 MOSFET 元件包括 AC/DC 及 DC/DC 功率轉換應用，並且將取得這些舊有元件目前的 120 億美元的市場份額。

氮化鎵技術的發展進程還是剛剛開始。由於該技術遠遠未能達到它理論上的性能極限，因此我們可以合理地預期這種元件可以根據摩爾定律般改進——摩爾定律預測微處理器技術的發展將最少在未來十年內於產品性能方面可以在每兩年至四年之間得以倍增。

除了性能及成本得以改善外，由於氮化鎵技術最大的機遇是它的固有特性可整合多個

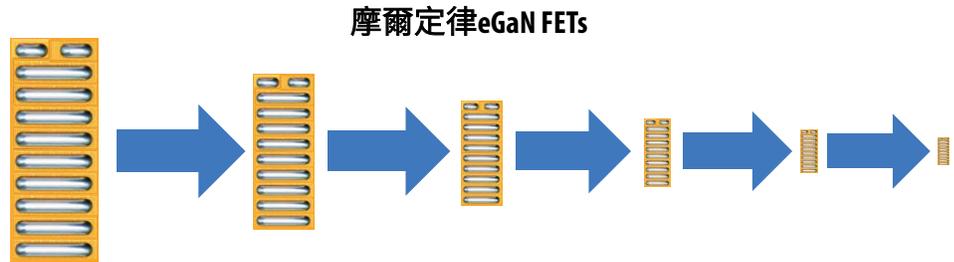


圖1: 我們預測氮化鎵場效應電晶體的性能可於每兩年之間得以倍增，因此可以用更小的外形設計實現更高的性能

元件於相同的基板上，因此對功率轉換市場的影響深遠。與常用的矽積體電路技術相反，氮化鎵技術將來可讓設計師更直接地及以低成本在單個晶片上實現單片式功率系統。

目前在功率轉換應用中最常用的基本拓撲是半橋拓撲，因此它成為開展設計功率系統晶片 (SoC) 旅程的起點。

圖2展示了第一個商用的增強型單片式半橋氮化鎵積體電路。這個系列的第一個產品是 EPC2100，它的額定電壓為 30 V。上面的場效應電晶體 (Q1) 的導通電阻 ( $R_{DS(on)}$ ) 典型值為 6 mΩ，而下面的場效應電晶體 (Q2) 的導通電阻 ( $R_{DS(on)}$ ) 典型值為 1.5 mΩ。

它使用可以改善開關速度及散熱性能的芯片封裝方式，其尺寸為 6 mm x 2.3 mm。圖3是元件的 pin-out 配置。Gate 1 是高側閘極引腳。GR1 是高側閘極迴路引腳。Gate 2 是低側閘極引腳。 $V_{SW}$  是半橋的開關節點，包含並聯連接在印刷電路板上的 35 只獨立焊錫引腳。 $V_{IN}$  是對頂部場效應電晶體 (Q1) 的汲極提供輸入電壓，包含 8 只並聯連接的引腳。 $P_{GND}$  是在下面的場效應電晶體 (Q2) 的源極端子的功率接地連接，包含 29 只並聯連接的引腳。通過整合兩個功率場效應電晶體而形成單片式元件，可以去除互連電感及印刷電路板上晶片與晶片之間所需的空隙，從而提高效率 (尤其是在更高頻率時) 及提高功率密度並同時降低組裝成本。

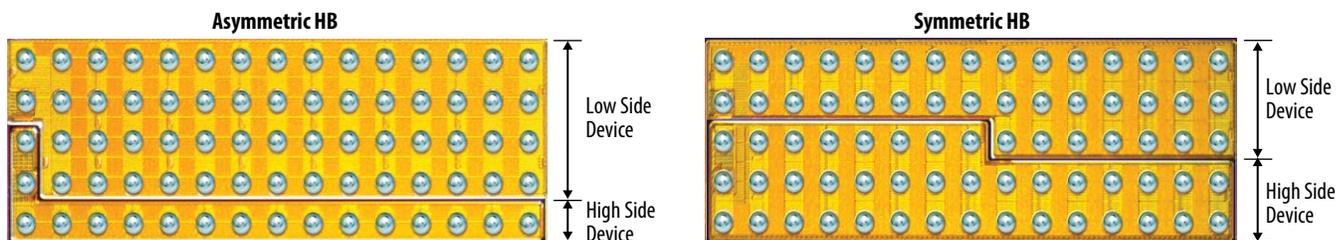


圖2: 在單晶片上整合兩個氮化鎵場效應電晶體 (eGaN FET) 而形成單片式半橋元件並使用芯片封裝方式 (Bump Side)

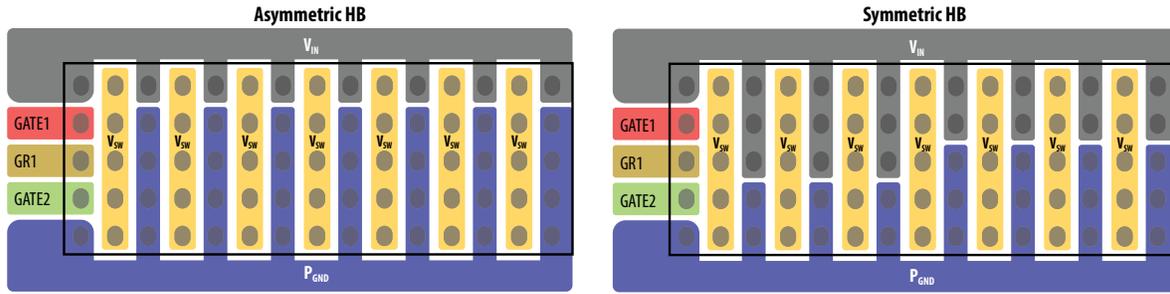


圖3:圖2所展示的元件的Pin-out

器件型號	配置	V <sub>DS</sub>	R <sub>DS(on)</sub> @5 V <sub>GS</sub> 最大值(mΩ)	Q <sub>G</sub> 典型值 (nC)	Q <sub>GS</sub> 典型值 (nC)	Q <sub>GD</sub> 典型值 (nC)	Q <sub>OSS</sub> 典型值 (nC)	Q <sub>RR</sub> (nC)	I <sub>D</sub> (A)	脈衝 I <sub>D</sub> (A)	半橋式 開發板
EPC2100	Dual 不對稱	30	8.2 2.1	3.6 15	1.3 4.8	0.6 2.7	6.1 29	0	10 40	100 400	EPC9036
EPC2102	Dual	60	4.9	8	2.5	1.5	26 31	0	30	220	EPC9038
EPC2101	Dual 不對稱	60	11.5 2.8	3.3 13	1.1 3.9	0.5 2.2	9.3 45	0	10 40	80 350	EPC9037
EPC2103	Dual	80	5.5	6.5	2.2	1.1	30 34	0	30	195	EPC9039
EPC2105	Dual 不對稱	80	14.5 3.6	2.7 11	0.9 3	0.5 2.1	11 51	0	10 40	70 300	EPC9041
EPC2104	Dual	100	6.8	6.8	2.3	1.4	35 41	0	30	180	EPC9040

表1: 整合式氮化鎵功率元件的產品選型指南

表1展示出半橋式積體電路系列的所有元件。在這個系列的首三個半橋積體電路，高側場效應電晶體的尺寸大約是低側元件的四分之一，具備高V<sub>IN</sub>/V<sub>OUT</sub>比，在降壓轉換器可實現最優越的DC/DC轉換效率(見圖4)。在需要對稱的晶片尺寸的應用中，例如磚式電源、馬達驅動器及D類音頻放大器，表1所列出的最後兩個半橋IC的高側與低側場效應電晶體的晶片尺寸相同，如圖2及3所示。

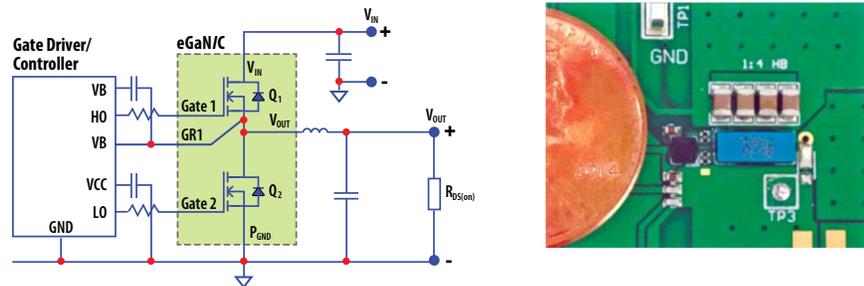


圖4: 這是一個12 V<sub>IN</sub>、1.2 V<sub>OUT</sub>的降壓轉換器。左圖是電路原理圖。右圖是使用EPC2100 eGaN半橋元件的實際電路。

圖4展示出一個12 V<sub>IN</sub>轉1.2 V<sub>OUT</sub>的負載點降壓轉換器及圖5展示出測量所得的電路效率。在500 KHz及10 A時，降壓轉換器的峰值效率接近93%。在20 A時的效率則超過91.5%。

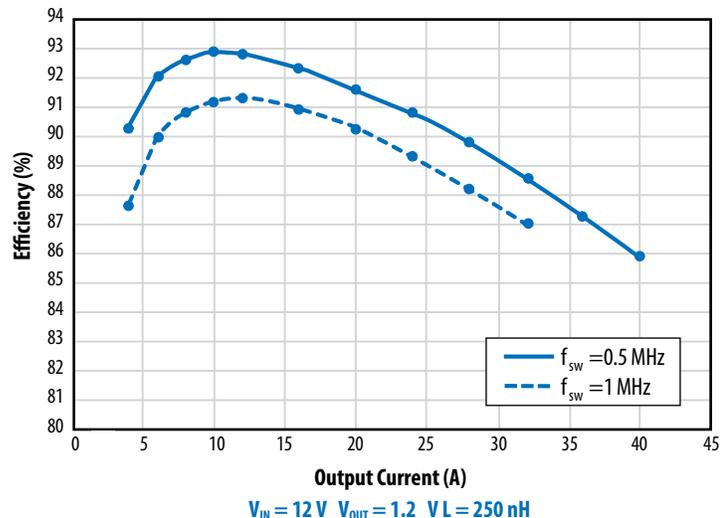


圖5: 採用EPC2100半橋元件的降壓轉換器工作在500 KHz及1 MHz時所實現的總效率

在更高頻工作條件下，積體電路的優勢更為明顯。圖6比較了兩個降壓轉換器分別工作在1 MHz及4 MHz頻率時它們在不同輸出電流的效率。藍色綫代表採用分離式氮化鎵場效應電晶體 (eGaN FET) 的轉換器。黑色綫代表採用EPC2100單片式半橋元件的降壓轉換器。由於半橋式元件的尺寸比兩個分離式場效應電晶體的總晶片尺寸小33%，因此同步整流器場效應電晶體 (Q2) 的阻抗高出大約50%，以及在低頻及大電流情況下，採用單片式半橋元件的降壓轉換器的效率較低。可是，當頻率增加至4 MHz，單片式半橋元件的峰值效率比分離式元件的峰值效率高出大約2% (見圖6)。

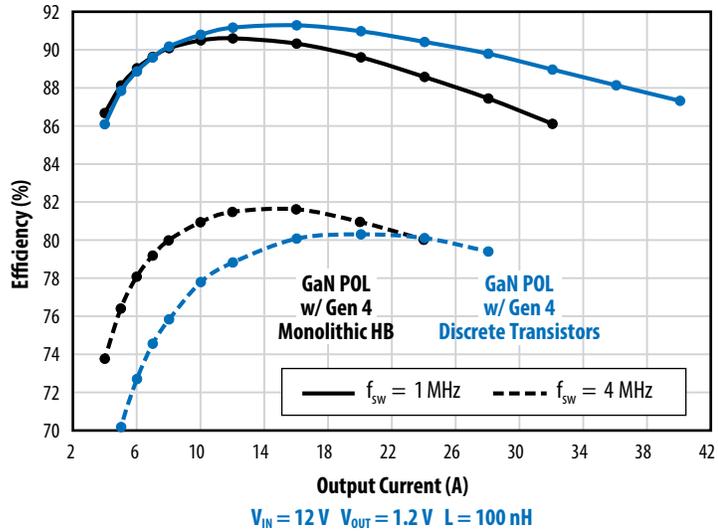


圖6: 與分離式氮化鎵場效應電晶體 (Q1: EPC2015; Q2: EPC2023)相比, 採用 EPC2100半橋元件的降壓轉換器的總效率

去除在晶片與晶片之間的空隙並配以最優越的功率迴路佈局可以大大減少總功率迴路電感至低於200 pH – 這是少於分離式元件 EPC2015所述的一半電感[2]。這使得電壓在三分之二納秒範圍內轉換, 以及在25 A開關時的過衝也只是3.6V (見圖7)。

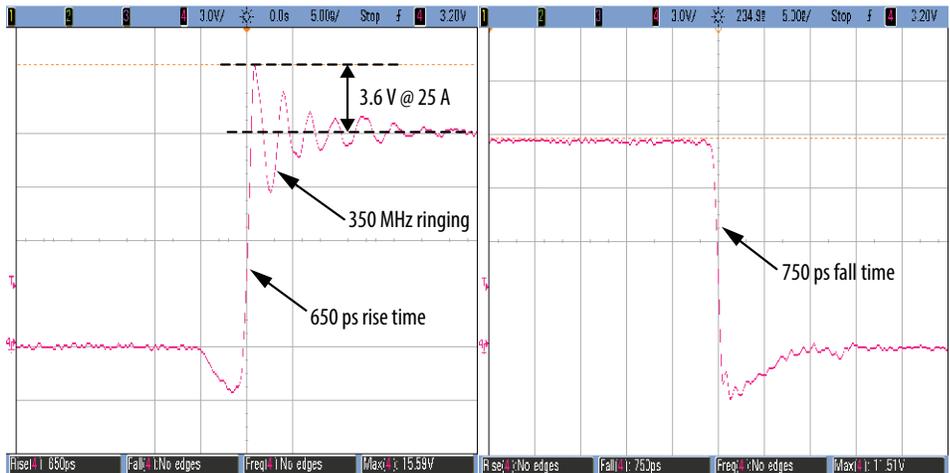


圖7: EPC2100元件的開關節點波形圖: 12 V<sub>IN</sub> 轉至 1.2 V<sub>OUT</sub>、25 A<sub>I<sub>OUT</sub></sub>、1 MHz、650 ps上升時間及750 ps下降時間

讓我們探究當負載點轉換在更高輸入電壓時, 圖8展示出採用EPC2101並工作在500 KHz頻率下的轉換器的效率。EPC2101是一個60 V半橋式氮化鎵積體電路, 可以轉換高很多的匯流排電壓, 例如它可高效地從28 V及42 V轉至1 V。圖9展示了這種轉換應用的開關節點波形圖。

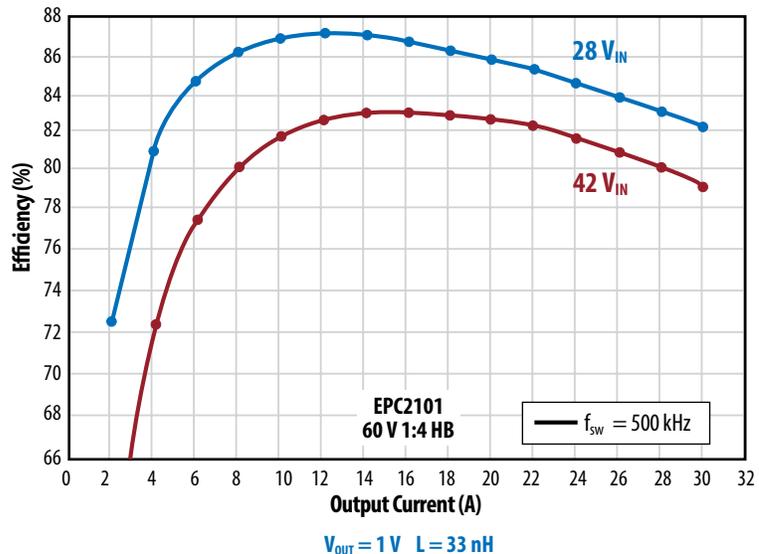


圖8: 採用EPC2101半橋式積體電路的降壓轉換器的總效率

在具備更高輸入電壓的負載點轉換時, 圖10展示了轉換器在採用EPC2105並工作在500 KHz頻率時的效率。EPC2105是一個80 V半橋式氮化鎵積體電路, 可以高效地從48 V轉至1 V。當全降壓轉換器系統在16 A時可實現超過80%的峰值效率, 並可以省去數據通信系統通常需要的兩級電壓轉換。

在需要更對稱的元件比例的應用中，圖2展示出80 V的EPC2103及60 V的EPC2102為單片式半橋eGaN積體電路提供兩個尺寸相同的晶片。圖11展示了一個48 V<sub>IN</sub>轉12 V<sub>OUT</sub>的負載點降壓轉換器的總系統效率。要實現更低的降壓比及更高的佔空比，圖11展示出對稱的半橋氮化鎵元件可取得更高的效率，以及具備快速開關性能，在48 V輸入電壓及20 A的輸出電流下，上升時間為2.1 ns及下降時間為1.4 ns (見圖12)。

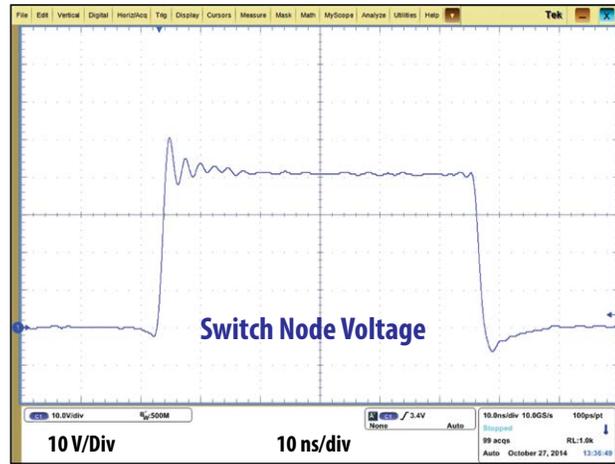


圖9: 在  $V_{IN} = 42\text{ V}$ 、 $V_{OUT} = 1\text{ V}$ 、 $I_{OUT} = 20\text{ A}$  及  $f_{SW} = 500\text{ kHz}$  時的開關節點電壓

分離式氮化鎵場效應電晶體大批量生產已經達五年之久，並進駐了很多目前 MOSFET 元件的傳統應用。由於全新技術的學習曲線及發展比舊有元件更快速，因此氮化鎵元件在效率方面的績效差距正在不斷擴大 [3]。現在設計師可利用單片式 eGaN 半橋元件系列中的三個範例節省佔板面積、提高效率及降低系統成本。當功率轉換系統工作在數 MHz 頻率時，整合多個分離式元件變得更為重要，從而實現高系統效率及高功率密度。

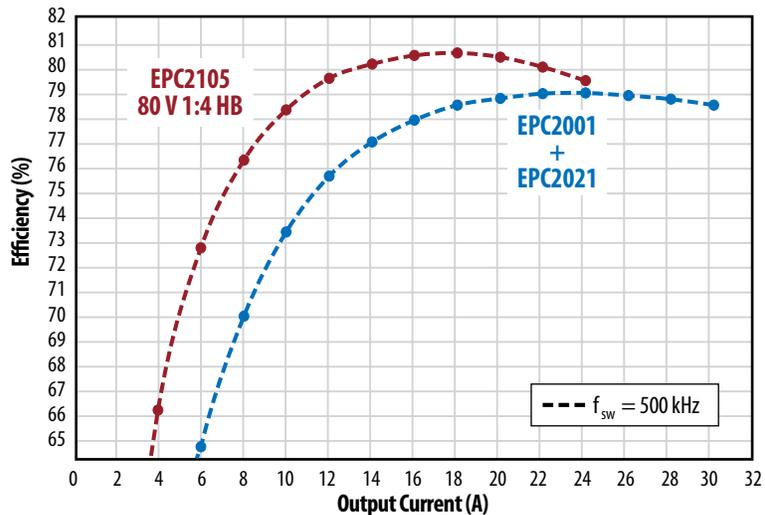


圖10: 比較採用EPC2105半橋式積體電路與採用分離式氮化鎵場效應電晶體 (eGaN FET) 的降壓轉換器的總效率

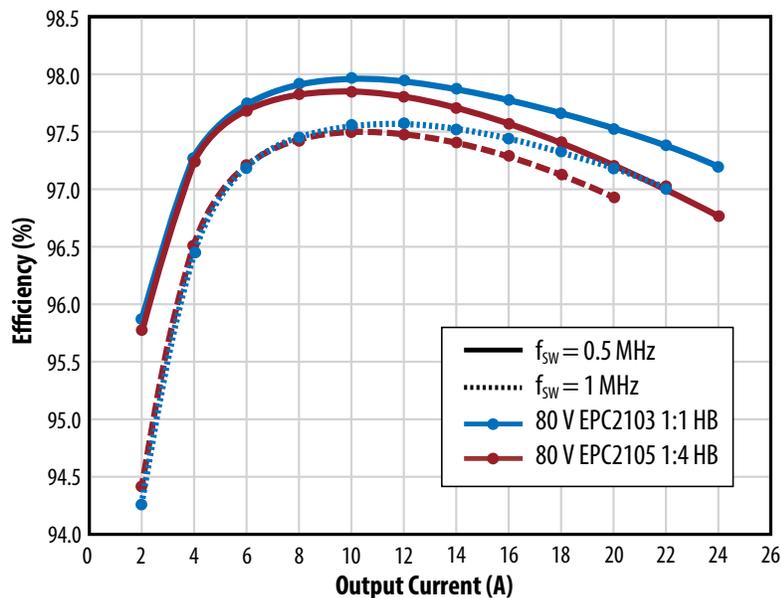
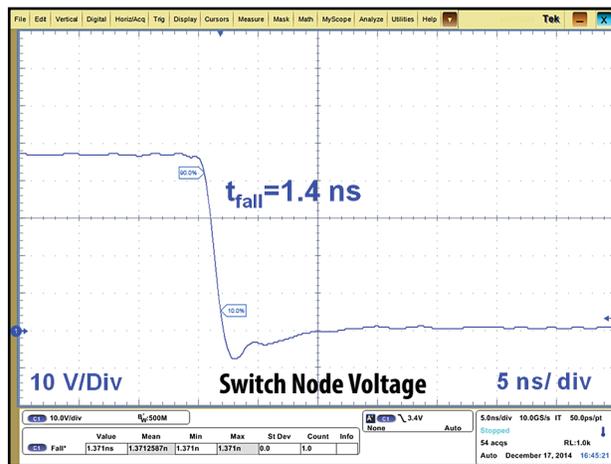
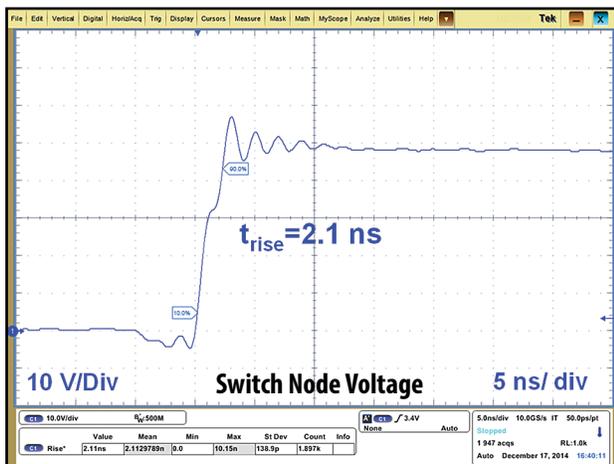


圖11:採用EPC2103及EPC2105半橋元件的降壓轉換器的總效率



$V_{IN} = 48$  V  $I_{OUT} = 20$  A

圖12:EPC2103的開關節點波形圖,在48 V轉12 V及20 A的輸出電流下,上升時間為2.1 ns及下降時間為1.4 ns

參考資料:

- [1] A. Lidow, J. Strydom, M. de Rooij, and D. Reusch, "GaN Transistors for Efficient Power Conversion, Second Edition," J. Wiley, 2015.
- [2] D. Reusch, J. Strydom, "Understanding the Effect of PCB Layout on Circuit Performance in a High Frequency Gallium Nitride Based Point of Load Converter," APEC 2013, pp.649-655, 16-21 March 2013.
- [3] <https://epc-co.com/epc/Products/eGaNfETs/Gen4eGaNfETs.aspx>