

矽功率MOSFET在電源轉換領域的發展已經走到盡頭了嗎？



宜普電源轉換公司首席執行長Alex Lidow博士

在過去30多年中，隨著我們日常生活對電能需求的不斷增加，功率MOSFET的結構、技術和電路拓撲也緊跟著不斷創新，電源管理效率和成本隨之而得到了穩步改善。然而在最近幾年，隨著矽功率MOSFET逐漸接近其理論極限，這種改善速度也在不斷減緩。

擁有30年發展史的矽功率MOSFET

作為雙極電晶體的替代品功率MOSFET最早在1976年出現。與那些少數載流子元件相比，這些多數載流子元件速度更快、更堅固，並且具有更高的電流增益。因此開關型電源轉換技術得以真正商用化。早期桌面電腦的AC/DC開關電源是最早使用功率MOSFET的批量消費產品之一，隨後出現了變速電機驅動、螢光燈、DC/DC轉換器等數千種應用，如今已經深入我們的日常生活。

國際整流器公司在1978年11月推出的IRF100是最早的功率MOSFET元件之一。這種元件具有100 V的汲極-源極擊穿電壓和0.1 Ω的導通電阻，樹立了那個時代的基準。由於裸片尺寸超過40 mm²，價格高達34美元，因此這種產品沒有立即廣泛地替代傳統雙極電晶體。

多年來許多製造商持續推出了許多代功率MOSFET產品。30多年來的基準基本上每年

都會更新。在寫這篇文章時，英飛凌公司的IPB025N10N3G被公認為是100 V基準的保持者。與IRF100的4 Ω-mm²品質因數(FOM)相比⁽¹⁾，IPB025N10N3G的品質因數不到0.1Ω-mm²。這個值幾乎已經達到矽器件的理論極限⁽²⁾。

不過其改進仍在持續。例如CoolMOS元件和IGBT的導通性能已經超過了簡單垂直型多數載流子MOSFET的理論極限。這些創新發展在相當長一段時間內可能還會繼續，並且會充分利用功率MOSFET的低成本結構和訓練有素的設計師，而這些設計師經過多年實踐後已經學會如何有效地發掘電源轉換電路和系統的性能。

開啟GaN新時代

HEMT(高電遷移率電晶體)GaN電晶體大概最早在2004年出現，當時日本的Eudyna公司推出了一種耗盡型射頻電晶體。通過在碳化矽基板上使用GaN，Eudyna公司成功生產了為射頻市場

設計的電晶體⁽³⁾。HEMT結構基於的是1975年最先由T. Mimura et al⁽⁴⁾描述，並且在1994年再次由M. A. Khan et al⁽⁵⁾描述的一種現象。這種現象展示了接近AlGaIn和GaN異質結構介面之間介面處異常高的電遷移率。將這種現象應用於碳化矽上生長的氮化鎵，Eudyna公司成功生產出在數兆赫茲頻率範圍內的基準功率增益。而Nitronex公司在2005年推出第一種耗盡型射頻HEMT電晶體，這種電晶體利用矽基上生成的GaIn⁽⁶⁾晶圓製造，採用的是公司自己的SIGANTIC[®]技術⁽⁷⁾。

隨著另外幾家公司參與市場，GaN射頻電晶體在射頻應用領域繼續闊步前進。但這個市場之外的接受性非常有限，主要原因是元件成本和耗盡型操作的不方便。

宜普公司在2009年6月推出了首款增強型矽基GaN功率電晶體，這種電晶體專門設計用於替代功率MOSFET。這些產品可以使用標準矽製造技術和設備，以低成本大批量生產，其結構比較簡單，見圖1。

突破屏障

30年的矽功率MOSFET歷史告訴我們，控制突破性技術的普及率有四大關鍵因素：

1. 這種技術能否支援重大的新功能？
2. 這種技術是否容易使用？
3. 這種技術對使用者來說是否極具成本效益？
4. 這種技術是否可靠？

在接下來的章節中我們將根據上述四條準則展開討論能夠替代主流矽功率MOSFET的矽基板GaN功率電晶體之現狀。然後我們會進一步瞭解GaN的近期開發計劃，並預測它們對電源轉換行業的影響。

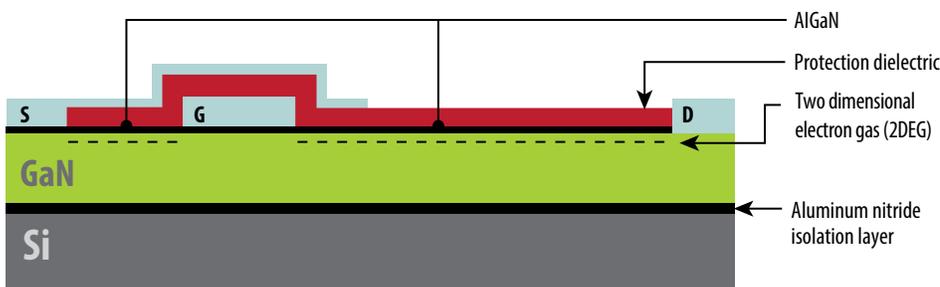


圖1: 矽基GaN器件具有與橫向型DMOS元件類似的非常簡單結構，可以在標準CMOS代工廠製造

GaN功率電晶體支援的新功能

增強型GaNHEMT器件(eHEMT)能支援的最大新功能是開關性能和整個元件頻寬的突破性改善(見圖2)。GaN擁有比矽高得多的關鍵電場,因此這種新元件的汲極至源極之間可以承受高得多的電壓,而對導通電阻的負面影響卻很小。

在功率MOSFET中,在元件從導通到關斷(或從關斷到導通狀態)所需的元件傳導率和電荷數量之間需要做一個基本的權衡。從這種權衡可以推出稱為RQ乘積的品質因數。這個指標被定義為元件的導通電阻乘以在正常工作電壓和電流條件下開關元件所必需向閘極提供的總電荷量。事實表明,改善這個指標有助於提高高頻DC/DC轉換器的轉換效率。RQ的絕對值一般也反映了實際電路中可以實現的最小脈寬。雖然過去幾年中RQ乘積得到了很大的改善,但矽功率MOSFET的品質因數仍未真正接近市場上已經推出的第一代eHEMT元件。圖3對額定電壓為100 V和200 V的基準矽元件和GaN元件作出了比較。

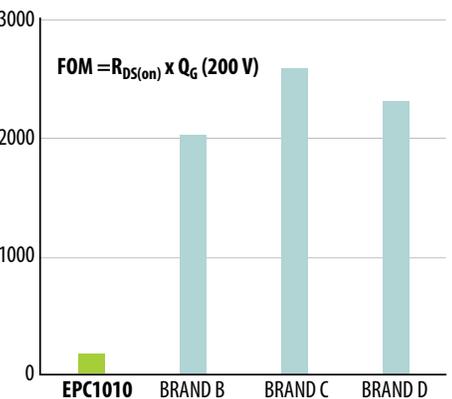
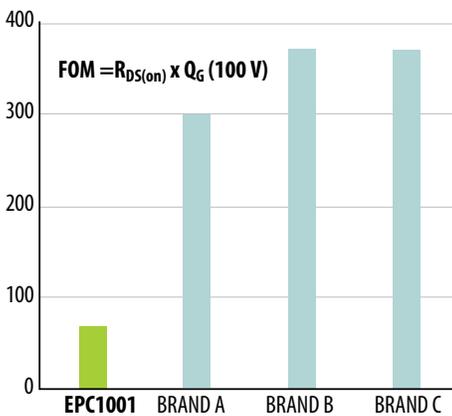


圖3: 100 V和200 V的基準矽功率MOSFET和GaN的RQ乘積比較

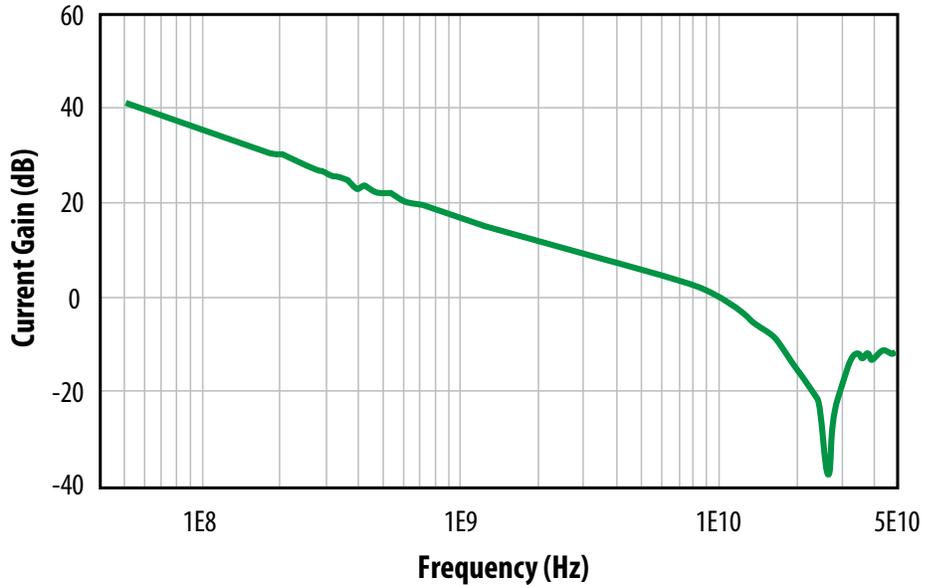


圖2: 宜普公司增強型GaN功率電晶體的增益與頻率關係曲線

DC/DC轉換器

能夠快速開關並且沒有太多功率損失意味著使用者在電源轉換電路中可以採用更小的脈衝寬度。需要這種能力的一種重要新興應用是非隔離型DC/DC轉換器。矽功率MOSFET的基本極限性能限制了單級非隔離型降壓轉換器的指標,其實際的輸入電壓與輸出電壓之比最大值只能達到10:1。除了這個比值外,降壓電路頂端電晶體要求的短脈寬也將導致不可接受的高開關損耗和由此引起的低轉換效率。GaN電晶體完全打破了這一性能框架,如圖4和圖5所示。

GaN除了能增加V_{IN}/V_{OUT}比值範圍外,還能顯著降低降壓轉換器在任何V_{IN}/V_{OUT}比值時的開關損耗。比較12 V至1V轉換器就可以發現這種性能的顯著改善,見圖6。

隨著新的GaN電晶體快速涵蓋當前功率MOSFET和IGBT的電流和電壓範圍,AC/DC轉換、同步整流和功率因素校正都將能實現明顯的性能提高。

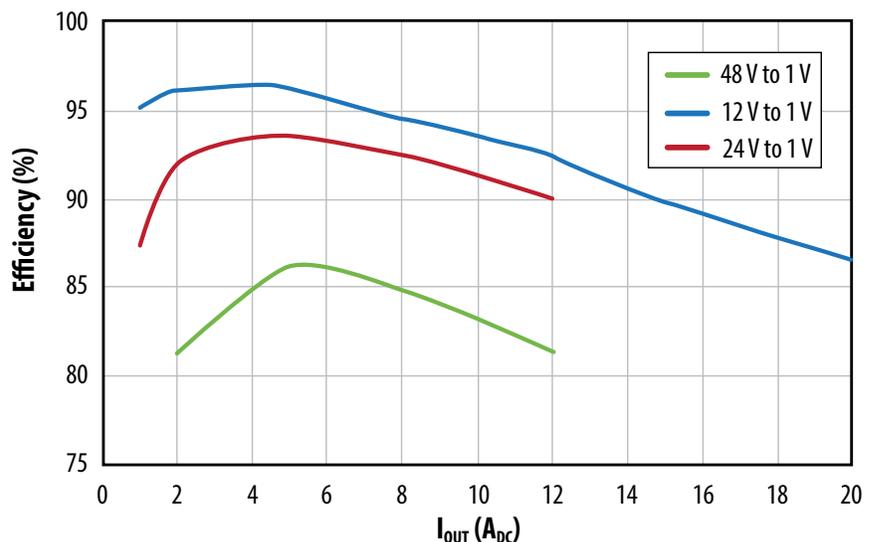


圖4: 不同輸入電壓下降壓轉換器效率與電流的關係。這種轉換器中的頂部和底部電晶體用都是單路100 V EPC1001。對於矽元件來說,輸入輸出電壓比超過10:1通常被認為是不可能實現的

48 V – 1 V Conversion (300 kHz)

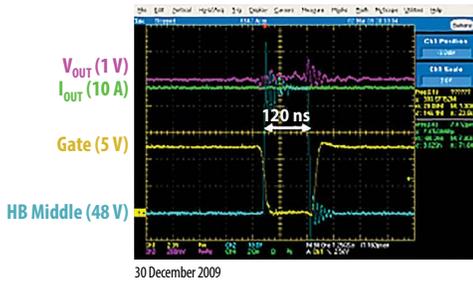


圖5a: 在降壓拓撲中使用EPC1001電晶體實現的300 kHz 48 V至1V轉換波形

48 V – 1 V Conversion (1.5 MHz)

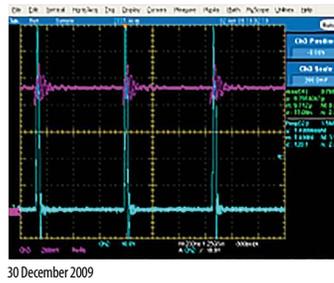


圖5b: 開關頻率為1.5 MHz的48 V至1 V轉換波形

48 V – 0.5 V Conversion (300 kHz)

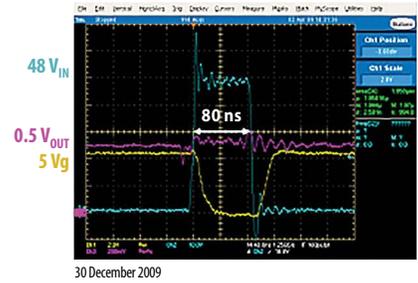


圖5c: 48 V至0.5 V轉換波形

D類音頻放大器

D類音頻放大器經常面臨成本、體積和聲音失真之間的折衷考慮。影響失真的最大因素是死區時間和輸出濾波器的相移。

D類音頻放大器有3種根據死區時間改變輸出脈寬的獨特操作模式。正向電感電流模式是基於高側開關進行整流，反向電感電流模式是基於低側開關進行整流，而雙向電流則基於每個開關進行整流。這些模式將死區時間分別設置在上升沿、下降沿或既不是上升沿也不是下降沿的地方。死區時間的長短決定了與這種現象有關的失真度。有限開關速度和體二極體前向電壓將進一步增強這一效應。增強型GaN電晶體具有非常低的閘極電荷，因此具有非常短的延時和非常快的開關速度。高精度的開關允許更好地控制開關情況，進一步縮短死區時間，從而實現更低的失真。

輸出濾波器的尺寸和反饋增益由開關頻率決定。在低開關頻率時，必須使用大的濾波電容和電感，以便從想要的信號中消除載波頻率。大值的濾波元件不僅增加了放大器的成本和尺寸，還會造成相移，從而降低系統的穩定性，限制用於補償許多元件失真的反饋增益，最終影響系統的

保真度。採用傳統矽MOSFET時開關頻率非常有限，因為功耗會由於高開關損耗而迅速上升。

GaN電晶體能夠同時提供低的 $R_{DS(ON)}$ 和低的閘極電荷(QG)，因此在數MHz範圍內都能够具有出色的效率。這時放大器可以使用更小值的濾波元件，從而減少它們對成本、尺寸和失真的影響，並允許更高的反饋增益，減小開關放大器對失真的影響。是以增強型GaN電晶體可以給D類應用帶來明顯更高的保真度和更低的成本。

增強型GaN電晶體易於使用嗎？

元件是否容易使用取決於多方面因素，包括使用者技能、待開發電路的難易程度、與使用者熟悉的元件相比有多大的差異以及幫助使用者使用元件的工具等。

新一代增強型GaN電晶體的行為與現有功率MOSFET非常相似，因此使用者可以充分利用已有的設計經驗。有兩個關鍵領域需要特別加以關注：較低的閘極電介強度(及在有限閘極漏電流在每毫米閘極寬度微安培數量級)和較高的頻率回應。這兩種差異中的第一種——較低閘極電介強度將隨著技術的成熟而不斷提高。同時需

要採取一定的措施消除工作區的靜電放電現象，並且設計電路時要保持VGS低於資料手冊中的最大值⁽⁸⁾。第二種差異——較高頻率回應一方面是指階躍函數性能比以前任何矽元件要高，另一方面使用者在設計電路板圖時需要多加考慮。例如少量的雜散寄生電感可能導致閘極至源極電壓發生較大的過沖現象，進而有可能損壞元件。

另一方面，也有幾種特性使得這些元件比它們的前代矽元件更加容易使用。例如閘值電壓實際上在很寬範圍內獨立於溫度⁽⁸⁾，導通電阻的溫度系數也比矽小得多^(8,9)。

GaN電晶體也能夠在高達300°C的溫度下正常工作，但在125°C以上，PCB的焊接會影響實際應用。因此第一款商用增強型器件的工作溫度最高為125°C。

表1從易用性的角度對矽功率MOSFET和EPC1001 GaN電晶體的基本特性作出了較為完整的比較。

易於使用的工具對新元件的易用性起了很大的作用。宜普公司已經開發出一整套TSPICE元件模型供使用者下載使用⁽¹⁰⁾。圖7顯示了一個簡單電路，並對實際元件性能和使用TSPICE模型模擬的結果作了比較。雖然還需要做多些使這些模型操作完善的工作，但第一代產品應提供相當可靠的電路性能預測，從而提高工程師的產能，縮短產品推出市場時間。

多年來的應用手冊和設計技巧累積了工程師們的集體智慧和經驗，描述在上百種使用功率MOSFET的應用中及已刊載在數千條的應用筆記。GaN使用者可能要花幾年時間才能理解如此大量的知識，但是因為增強型GaN電晶體和矽功率MOSFET之間的相似性，這些知識及經驗將繼續有效。是以指導使用者使用具有非凡特性的GaN應用筆記，可從許多現有資料來源找到^(11,12)。

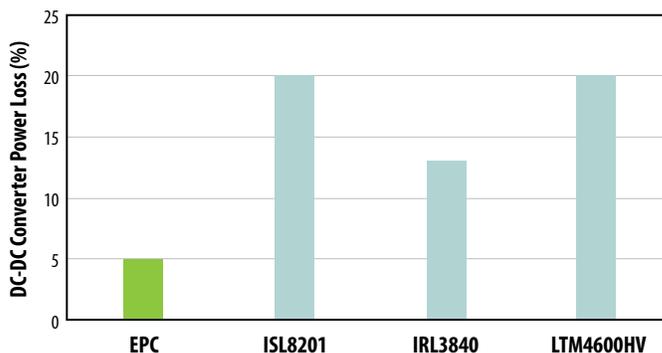


圖6: 對3種流行的負載點轉換器和採用EPC1014/EPC1015GaN電晶體開發的轉換器在 $V_{IN} = 12\text{ V}$ 和 $V_{OUT} = 1\text{ V}$ 、電流為5A和開關頻率為600 kHz時的功率損失比較

	Typical 100 V Power MOSFET	EPC1001 Enhancement-Mode GaN
Max Gate Source Voltage	± 20 V	+6 V / -5 V
Operating Temperature	150°C	125°C
Avalanche Energy	OK	Not Rated
Gate Threshold	2-4 V	0.7-2.5 V
Gate-Source Leakage	few nA	few mA
Gate Resistance	few Ω	approx 0.6 Ω
Switching Charge	high	very low
Reverse Diode Recovery Charge	high	zero
Ratio $R_{DS(on)}$ 125°C / 25°C	2.2	1.5
Ratio V_{TH} 125°C / 25°C	0.66	1

表1

對使用者而言是否極具成本效益？

基於不同技術而製成的產品,其成本比較需要慎重進行。另外,如果供需失衡,產品價格就不能真實反映其成本。由於GaN功率電晶體市場還在早期的發展階段,因此最有意義的比是矽功率MOSFET和市場上第一代增強型電晶體之間的成本比較。

影響產品成本的基本因素包括:

- 初始材料
- 外延生長
- 晶圓製造
- 測試與裝配

為了便於分析,影響成本的其他因素如良率、工程成本、包裝和運輸成本和一般開銷成本,在不同的技術下被設定為相同。

初始材料

矽基GaN元件一般在150 mm基板上生產(未來產品將移植到200 mm),而這一領域中的許多製造商是在100 mm至200 mm的基板上生產功率MOSFET的。由於GaN元件使用標準的矽基板,因此與在相同直徑的初始材料上製造功率MOSFET相比,成本不變。事實上,在150 mm

和200 mm矽晶圓之間,每單位面積的成本差別是很少,因此我們可以得出的結論是GaN在每片晶圓之初始材料方面,就不存在真正的成本差異。如果考慮到具有相同電流承載能力的GaN器件面積比矽元件小,那麼GaN每個功能的成本會更低。

外延生長

矽外延生長是一種成熟技術,許多公司都製造高效率 and 自動化的機器。MOCVDGaN設備至少有兩個來源,包括美國的Veeco⁽¹³⁾和德國的Aixtron⁽¹⁴⁾。這兩家公司都製造功能強大且可靠的機器,這些機器的主要用途就是發光二極體製造中使用的GaN外延生長。沒有一台機器針對矽基GaN外延優化過,也沒有矽機器中常見的自動化水準。因此,矽基GaN外延要比目前的矽外延較為昂貴。

但這種情況不是一成不變的。由於沒有像矽元件那樣的極限值,製程時間和溫度、晶圓直徑、材料成本和機器產能都在快速進步。在今後幾年內,假如GaN作為矽功率MOSFET替代品而得到廣泛採納,那麼GaN外延成本有望迅速接近矽外延的成本。

晶圓製造

圖1所示的簡單結構在標準矽晶圓代工廠那裡製造並不複雜。加工溫度與矽CMOS相似,而且交叉污染也很容易管理。目前宜普公司的所有晶圓都在Episil公司加工,這是一家著名的臺灣代工廠。

在GaN功率元件和功率MOSFET的晶圓製造成本之間沒有材料方面的差異。

測試和裝配

矽基GaN器件的成本結構在裝配製程上有很大的區別,尤勝矽功率MOSFET,而測試成本是相同的。

矽功率MOSFET需要一個通常由銅引線框、一些鋁、金或銅線組成的環繞封裝,所有東西都在澆鑄的環氧封套內。對垂直矽元件的頂部和底部需要做連接,需要通過塑膠壓模防止濕氣進入有源元件,並且需要將熱量排出元件的方法。

諸如SO8、TO220或DPAK等傳統功率MOSFET封裝會增加成本、電阻和熱阻,並增加影響產品可靠性和品質的風險。

矽基GaN可以用作“倒裝晶片”,不會影響電氣、散熱或可靠性能。

從圖8可以看出,有源元件區域是與矽基板隔離的,很像藍寶石上矽元件。因此,有源GaN元件可以由鈍化層完全密封。另外,矽基板可以直接連接到散熱器,實現出色的散熱性能。

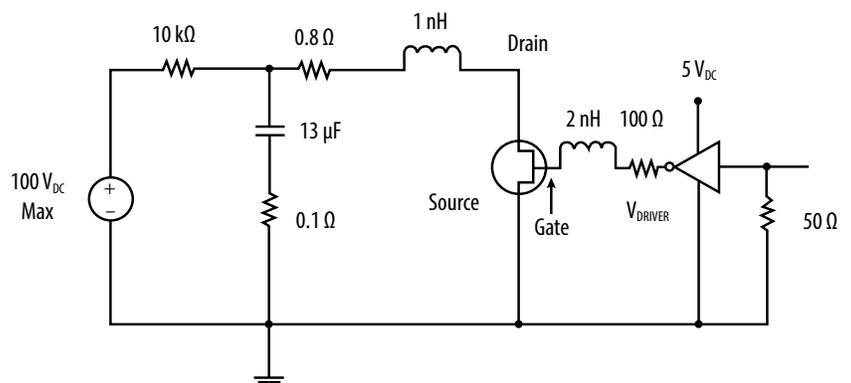
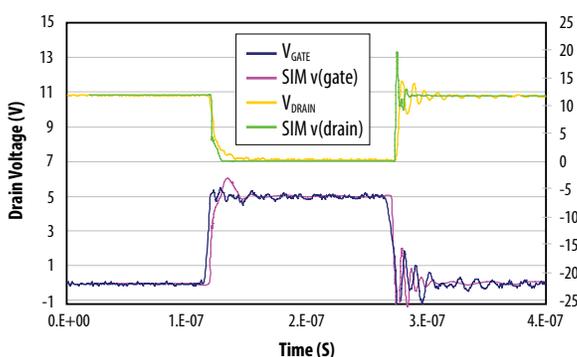


Figure 7: Circuit diagram and oscillogram comparing EPC1001 TSPICE simulation results with actual measured circuit performance

總而言之, 矽基GaN不需要封裝, 因此能去除與封裝相關的一切成本、電路板面積、熱阻、電阻及封裝後功率元件經常遇到的可靠性問題。

表2列出了2010年矽基GaN與矽功率電晶體的單位面積成本差異, 並預測到2015年時其成本差異。由於相同功能的矽基GaN器件面積更小, 總的結論是矽基GaN表現可以尤勝表2所列。

	2010	2015
Starting material	same	same
Epi Growth	higher	same
Wafer Fab	same	lower
Test	same	same
Assembly	lower	lower
Overall	higher	lower

表2

GaN可靠嗎?

在矽功率MOSFET方面累積的可靠性資訊量是非常驚人的。多年來許多人一直在埋頭理解故障機制、控制和調整製程, 並設計出有別於其他產品的、作為任何電源轉換系統中高可靠性的產品基準。矽基GaN電晶體才剛開始這一旅程。然而, 初步結果極其鼓舞人心。Nitronex公司已經發佈了他們的品質鑒定試驗結果⁽¹⁵⁾, 元件並已成功應用於許多射頻方案, 效果良好。

截止本文撰寫之日, EPC已建立了矽晶體管上增強型GaN的基本功能。完整的可靠性報告可從<http://epc-co.com/epc/tw/設計支援/可靠性.aspx>獲得。

圖9、10和11顯示了元件的中期表現結果。從圖中可以看到被測試元件在經過1000小時的閘極應力測試、汲極至源極應力測試和暴露在高濕環境且有偏置條件下的穩定性。

宜普公司把基於氮化鎵場效應電晶體的48 V轉1 V 直流-直流轉換器置於最大應力測試工作條件下達一千小時, 結果證明器件沒有發生故障。測試結果請參看圖12。

我們理解與這種新技術有關的各種故障機制還需要做很多工作。所有進入這一個全新領域的工程人員都可為這個知識庫作出貢獻。從目前我們擁有的資料來看, 這種技術如今已經能夠在商業應用中達至可接受的可靠水準。

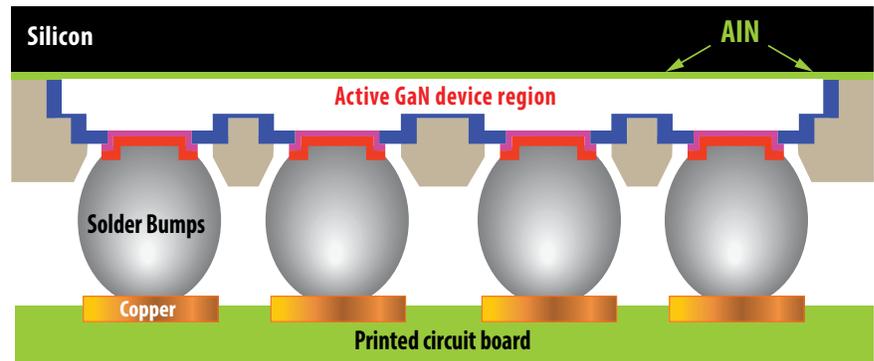


圖8: 矽基GaN可以用作“倒裝晶片”。有源元件與矽基板相隔離, 因此可以在劃片前實現完全密封

未來發展方向

GaN發展之路才剛剛開始。以品質因數RQ代表的基本元件性能將得到根本性的提升。隨著人們對材料和製程的進一步瞭解, 在今後3年內性能極有希望提高2倍, 而在今後10年內其性能則有望提高10倍。

我們也有望看到在不遠的將來GaN元件可以提供高得多的擊穿電壓, 因為宜普公司計劃推出600 V元件, 而其他公司也在公開討論這方面的計劃⁽¹⁶⁾。

對GaN來說, 影響電源轉換系統性能的最大機會也許來自在相同基板上同時集成功率級和信號級元件的固有功能。矽基GaN非常像SOI, 在元件之間沒有顯著的寄生交互, 因此設計師能夠很容易地在單個晶片上開發單片電源系統。

圖13、14和15顯示了已經製造出來的各種集成元件。圖13是松下公司製造的三相電機控制IC⁽¹⁷⁾, 內含用6個功率電晶體設計的板載IC驅動器。圖14是宜普公司開發的全橋功率元件, 圖15則是宜普公司提供的帶板載驅動器的功率電晶體。

總結

在二十世紀七十年代晚期, 功率MOSFET的開發先驅相信他們有了一種能夠完全替代雙極電晶體的技術。三十年後的今天, 我們仍有大量應用選擇了雙極電晶體而不是功率MOSFET, 但功率MOSFET市場規模要比雙極電晶體市場大許多倍, 因為所有新的應用和新的市場都是由這種突破性技術培育出來的。

今天, 增強型矽基GaN站在同樣的起跑線上。與1976年時的功率MOSFET一樣, 我們正在開始令人興奮的旅程, 幾乎在每個月都推出新產品和突破性功能。

功率MOSFET不會被完全淘汰出局, 但其性能和成本的重大改善行將結束。在將來的十年內, GaN由於在性能和成本方面擁有重大優勢而很可能成為主導技術。隨著學習曲線的不斷展開, 這種優勢將進一步擴大⁽¹⁸⁾。

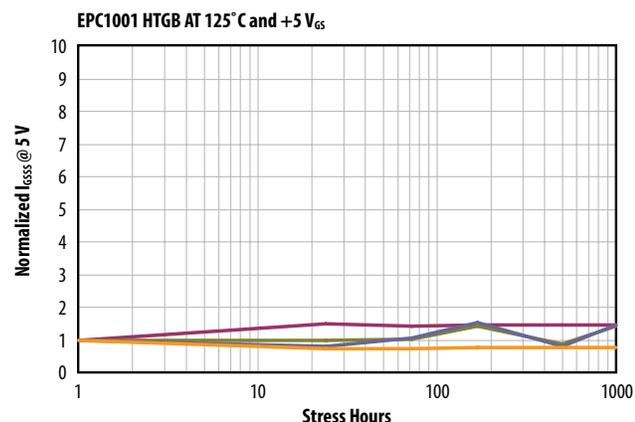


圖9: 在125°C和+5 V_{GS}條件下1000小時閘極應力能力。

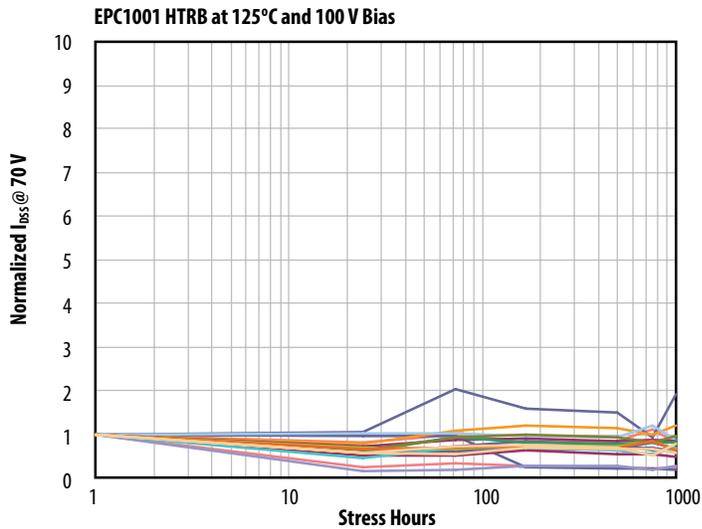


圖10: 在125°C和100 V_{DS}條件下1000小時汲極至源極應力能力

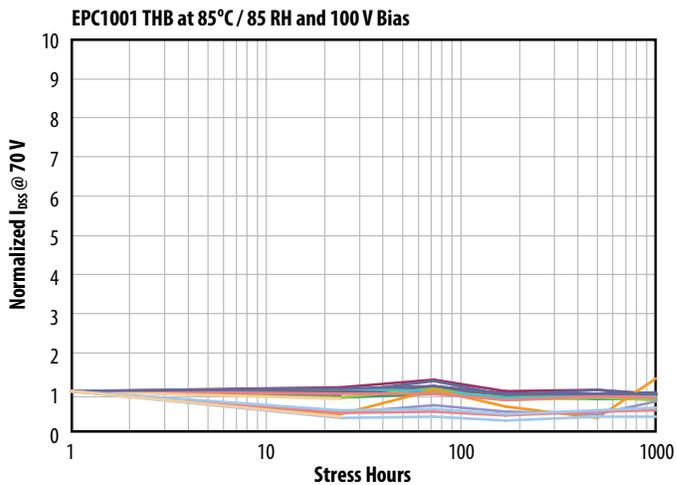


圖11: 在相對濕度85%、溫度85°C、100 V_{DS}和沒有底部填充情況下1000小時濕度應力能力

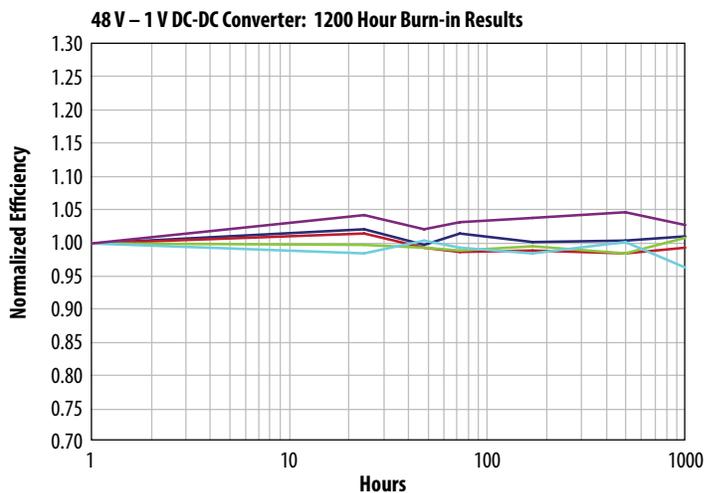
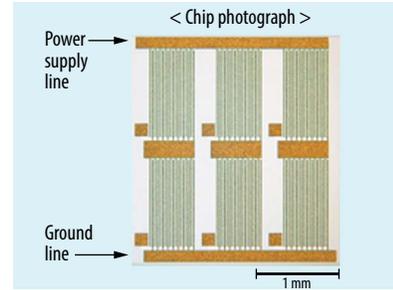


圖12: 在40°C環境溫度和10A電流條件下使用兩個EPC1001GaN電晶體的DC/DC轉換器,在連續工作1000小時後的結果



Gallium Nitride (GaN) Inverter IC
December 2009, Panasonic Corporation

圖13: 帶集成控制和增強型GaN功率元件的單相三相反相器IC

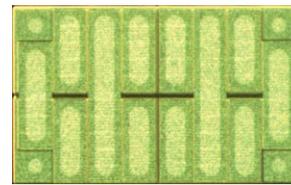


圖14: 宜普公司的單相全橋元件

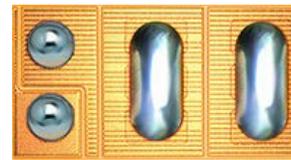


圖15: 宜普公司提供的帶集成式驅動器的GaN功率電晶體

附注

- (1) http://www.infineon.com/dgdl/IPB025N10N3+G_Rev2.1.pdf?folderId=db3a304313b8b5a60113cee8763b02d7&fileId=db3a30431ce5fb52011d1ab1d9d51349
- (2) B. J. Baliga, Power Semiconductor Devices, 1996, PWS Publishing Company, p. 373
- (3) E. Mitani, H. Haematsu, S. Yokogawa, J. Nikaido, Y. Tateno, "Mass Production of High Voltage GaAs and GaN Devices", CS Mantech Conference, April 24-27, 2006, Vancouver B.C., Canada
- (4) T. Mimura, N. Tokoyama, H. Kusakawa, K. Suyama, M. Fukuta, GaAs MOSFET for low-power high-speed logic applications, the 37th Device Research Conference, 25-27 June 1979, University of Colorado, Boulder, CO
- (5) M. Asif Khan, J. N. Kuznia, and D. T. Olson, in Applied Physics Letters, Vol. 65, No. 9, 29 August 1994
- (6) Supratik Guha and Nestor Bojarczuk, in Applied Physics Letters, Vol. 72, No. 4, 26 January 1998
- (7) http://www.businesswire.com/portal/site/home/permalink/?ndmViewId=news_view&newsId=20051005005600&newsLang=en
- (8) <https://www.epc-co.com> (EPC1001 datasheet)
- (9) http://www.infineon.com/dgdl/IPD068N10N3+G_Rev2.1.pdf?folderId=db3a304313b8b5a60113cee8763b02d7&fileId=db3a30431ce5fb52011d1eb7aeb615d1
- (10) <https://www.epc-co.com>
- (11) <http://www.nitronex.com/pdfs/AD-009.pdf>
- (12) <http://www.irf.com/product-info/ganpowir/introganpowir.pdf>
- (13) <http://www.veeco.com/mocvd-turbodisc-k465-gallium-nitride/index.aspx>
- (14) <http://aixtron.com/index.php?id=700&L=1>
- (15) <http://www.nitronex.com/reliability.html>
- (16) <http://www.sanken-ele.co.jp/en/news/contents/20080903e.htm>
- (17) <http://www.physorg.com/news179516515.html>
- (18) Graham Pitcher, "Power for Change - How GaN might revolutionize Embedded Power Device Design", www.newelectronics.co.uk, 27 January 2009