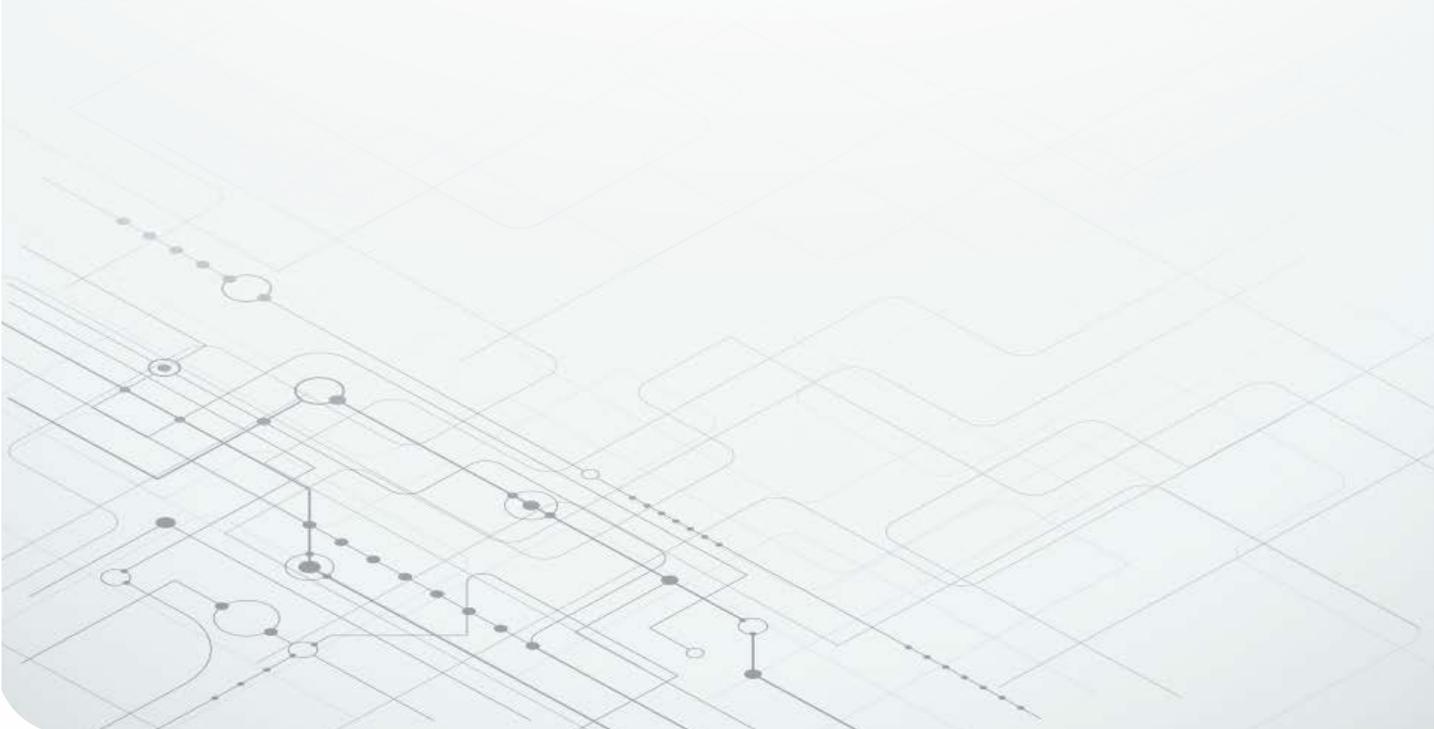


結合 TI GaN FETs 與 C2000™ 即時 MCU，實現功率密集與有效 率的數位電源系統



Cody J. Watkins

C2000 即時 MCU 應用工程師
德州儀器



電力電子產業設計人員需要新技術與方法來提升系統性能。C2000 即時 MCU 與 GaN FET 聯手滿足效率與功率密度挑戰。

摘要

本白皮書說明含整合式驅動器的 TI 氮化鎵 (GaN) 場效應電晶體 (FET) 與 TI C2000 即時微控制器 (MCU) 的功能如何協調運作，以解決電力電子設計人員在開發現代電源轉換系統時所面臨的問題。

- 1 GaN 為電力電子市場帶來革命**
您或許認為 GaN 還是新興技術，但 TI 的 GaN 技術已可處理各種產業挑戰，並準備好供各種開發使用。
- 2 為 GaN 選擇適當數位控制器**
GaN 的潛在優點眾多，但只有在選擇適當數位控制器的情況下，才能發揮完整效用。
- 3 透過高切換頻率降低系統成本**
GaN 因具有高切換頻率而可減少磁性元件、風扇與散熱體積，C2000 即時 MCU 則可處理因前述而帶來的固有控制挑戰。
- 4 以 GaN 裝置與 C2000 即時 MCU 進行介接**
C2000 即時 MCU 可控制來自 TI GaN FET 的所有回饋，且無需使用外部邏輯線路。

伺服器與電信電源供應器便是可從使用 GaN 中獲益的市場範例。數位通訊基礎架構市場持續成長，部分預期機架式伺服器市場將在接下來五年內增為兩倍，超大規模資料中心則會以將近 20% 的年複合成長率成長。

快速成長也帶來不斷增加的效率、功率密度與瞬態回應要求。GaN FET 大幅改善切換損耗與高功率密度，可幫助解決成長市場中因體積增加所帶來的技

術挑戰。

本白皮書將探索含整合式驅動器的 TI GaN FET 與 TI C2000 即時 MCU 功能的獨特定位，以處理電力電子設計人員在開發現代電源轉換系統時所面臨的問題。

GaN 為電力電子市場帶來革命

GaN 技術雖已顯示許多潛在優點，但您可能對其實用性還存在一些合法疑慮。雖然一般人普遍認為 GaN FET 是新科技，但此技術其實已存在超過 20 年。成本、保護與可靠性都是影響 GaN 使用的原因，TI 的 GaN 裝置系列特別針對這些問題加以處理。

成本

TI GaN FET 採用矽基氮化鎵程序，並運用現有 TI 處理技術節點。我們不僅能夠避免使用碳化矽或藍寶石等昂貴的基板，更可運用我們多年在矽晶技術的專業。TI 的開發、測試與封裝都在內部執行，目前讓 GaN 能夠具成本競爭力，之後成本更可進一步下降。

保護

TI 的 GaN 技術提供豐富診斷與自我保護功能。GaN FET 可自動偵測並處理過電流、短路、過低電壓與過熱情況。將這些情況同時通報給 MCU 可對控制演算法進行修正，以避免再次發生。

可靠性

TI 已為其 GaN 裝置紀錄超過 4 千萬裝置可靠時數，此外 10 年壽命間的失效率 <1。除了固有可靠性測試外，我們的 GaN 裝置暴露在最嚴苛的切換環境下，並完成 5-GW 小時的應用中壓力測試。

TI GaN 裝置將 FET 驅動器與 GaN FET 整合在單一封裝中，可解決成本、保護及可靠性問題。透過快速

切換, TI GaN FET 2.2-MHz 整合式閘極驅動器可提供的功率密度為矽晶的兩倍, 同時可實現 99% 效率。此技術可在 AC/DC 應用中提供最低損耗及最高效率。此外, 整合式高速保護及數位溫度通報功能可為電源供應單元 (PSU) 提供主動式電源管理與溫度監控。TI 技術擁有這麼多獨特優點, 也讓 GaN 的使用因此成真。

為 GaN 選擇適當數位控制器

GaN 提供的高切換頻率讓電源供應系統更有效率, 也可提升功率密度。這些通常需要較複雜的電源拓撲和控制演算法, 像是零電壓切換、零電流切換或具混合磁滯控制的電感器電感器電容器 (LLC) 諧振 DC/DC。

採用數位控制器對這類複雜拓撲很有幫助。您需要能夠處理複雜時間關鍵運算、提供精確控制, 並能透過軟體和週邊設備相容性進行擴充的控制器。C2000 即時 MCU 可直接解決這些考量。圖 1 說明 C2000 即時 MCU 和 GaN FET 驅動器。

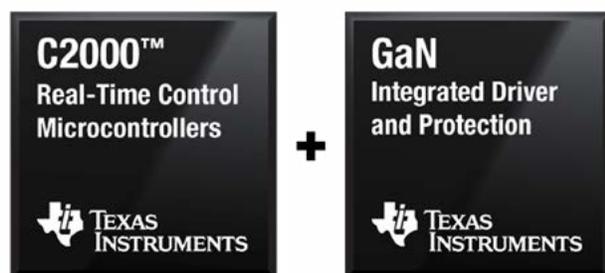


圖 1。C2000 MCU 與 TI GaN 彼此合作, 實現最有效率、可靠且功率密集的數位電源系統。

C2000 即時 MCU 指令效率

C2000 即時 MCU 擁有進階指令集, 可顯著減少複雜數學運算所需的週期數量。減少運算時間代表可在不提高裝置操作頻率的情況下提升控制環路頻率。許多效率增加都可以流暢的方式提供給使用者, 並會自動發生。代碼編譯器、中央處理器 (CPU) 管線及指令集都以為每個指令週期取得最大運算工率為設計目的。

使用者比較容易看到的是浮點單位 (FPU) 與三角函數數學單位 (TMU)。C28x 核心將這些強化式指令密切整合在一起, 讓指令可如一般 CPU 指令平行傳輸

與執行, 進一步提升每個時脈週期的效率。

舉例來說, FPU 的速度可達標準固定點運算之 2.5 倍以上。同時, FPU 也讓 C28x 核心得以運用模型式模擬及採用浮點數學運算的代碼產生工具。這代表可縮短您在開發代碼和驗證系統時耗費的時間, 也可加快產品上市時間。

TMU 可補充 FPU 的不足, 所得到的效果更比 FPU 本身高出 20 倍。在[使用 C2000 即時 MCU 參考設計的雙向高密度 GaN CCM 圖騰柱 PFC](#) 中, 嘗試計算控制脈衝寬度調變器 (PWM) 時間與失效時間時即可明顯看出優點, 運算時間將從 ~10 μ s 降低到 0.5 μ s 以下。因此可以逐週期方式為基礎執行主動式死區運算, 以對 GaN FET 獲得最精確且有效的控制。

滿足瞬態回應要求

小型逐週期效率為何如此重要? 其中一個原因是, 這些效率可讓您滿足更快速的瞬態回應要求。

瞬態回應要求可說明電源供應器對變動負載的反應速度有多快。舉例來說, 由於伺服器中現代處理器的功率要求較高, 要滿足瞬態回應要求也因此變得較為困難。過去 1 A/ μ s 很常見, 但現今標準要求的是 2.5 A/ μ s 或更高。提高控制環路頻率可改變對各種情況感測與反應的速度, 因此可帶來直接幫助。C2000 即時 MCU 的獨特處理能力能幫助處理這些瞬態回應要求。

為了滿足 5 A/ μ s 以上的最極端瞬態回應要求, C2000 即時 MCU 運用其整合式類比, 無需外部元件即可讓 PWM 訊號完全通過硬體。使用整合式類比比較器來比較回饋訊號與固定設定點或斜率產生器, 並藉由內部 12 位元數位類比轉換器 (DAC), 即可實現此控制。此技術為整個硬體控制環路帶來獨特的速度優勢, 並可維持數位控制器的靈活性。執行時會持續監控 PWM 跳脫點, 並會在軟體控制環路內部調整 DAC 輸出, 以與 PWM 跳脫完全獨立的方式進行調整。這代表 C2000 即時 MCU 可針對各種負載情況提供最快速的回應時間, 同時保持滿足效率標準的靈活性。

實現精確與安全的系統控制

GaN FET 中的擊穿與第三象限傳導潛能需要高精度

控制才能實現。C2000 即時 MCU 中的高精確 PWM 可為 PWM 的時間、工作週期、相位與死區帶來 150-ps 解析度。跳脫區子模組與內建類比比較器可安全處理錯誤情況，這些則以完全非同步的方式執行，並可在沒有 CPU 介入的情況下，以短短 25 ns 即可關閉 PWM 的輸出。

以簡易方式執行多相位系統

C2000 即時 MCU 將應用範圍擴展到單相設計以外，並可處理多相位設計所遇到的問題，其中所有相位都必須保持同步，以防止發生系統故障。您必須考量對 PWM 的頻率、工作週期或死區進行修改。這些數值的順序更新現在已很普遍，但順序更新需要了解硬體複雜知識，也需清楚所有可能的代碼排列，這在中斷式嵌入系統中特別困難。

C2000 即時 MCU 整體負載機制允許在單一指令周其中更新所有所需 PWM 暫存器，並且完全無需 CPU 介入，解此來處理 PWM 更新。此創新可提供對高頻率交錯式 LLC 拓撲的控制，並可同時消除通常由順序更新所帶來的間歇性不重複錯誤。運用整體負載機制不僅可帶來更穩健且安全的系統，更可減少系統驗證工作。

C2000 即時 MCU 產品組合的可擴展性

平價 C2000 即時 MCU (例如 F280025C) 將即時 MCU 的 C2000 產品組合 (如後續頁面中的圖 2 所

示) 擴展到可滿足小型伺服器電源設計的成本點，同時仍可提供獨特的處理與控制功能。當系統要求變更，C2000 平台可上下調整即時 MCU 功能 (類比轉數位轉換器 (ADC) 輸入、運算能力、PWM 通道、封裝)，同時維持軟體投資以快速上市。

透過高切換頻率降低系統成本

我們已討論 TI GaN 與 C2000 的個別優點，接著來探討系統級優勢。FET 切換損耗過去受到能將轉換器有效切換到幾百千赫的最大速度限制。切換頻率則設下磁層最小體積要求，對功率密度與系統成本要求會帶來負面影響。

如前所述，TI GaN 裝置中的整合式驅動器可提供高達 2.2 MHz 的切換頻率，以及高於

150 V/ns 的切換速度，與離散式 GaN FET 相比，可將速度提升為兩倍，並將損耗減為一半。這樣的整合功能搭配低電感封裝，可提供乾淨切換與最小振鈴。這些效率可縮小電源系統中使用的磁層體積，並能省去使用風扇或散熱器而降低系統成本，同時可提升功率密度。

克服高切換頻率的固有挑戰

TI GaN 裝置可提高系統切換頻率，將磁層整體尺寸減為過去的五分之一，並透過矽晶功率因數校正 (PFC) 應用將功率密度提高三倍。這些優點不僅可在 PFC 級實現，也適用整個電力電子系統。

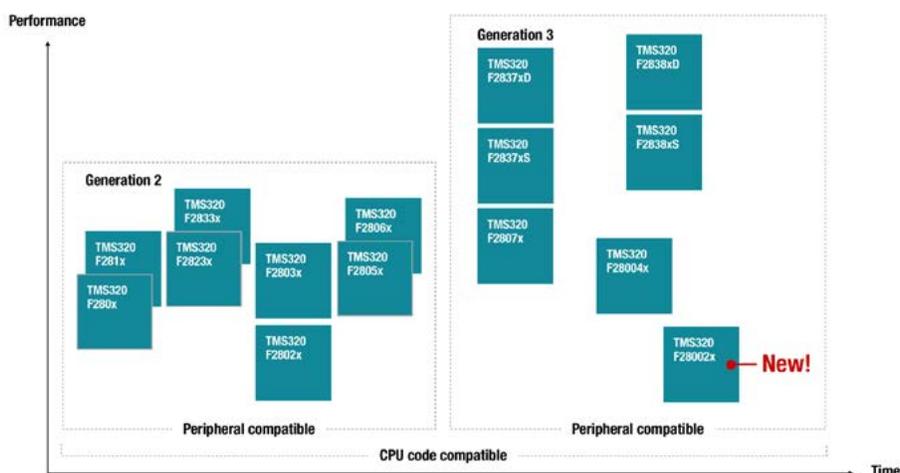


圖 2。支援 TI GaN 裝置的 C2000 即時 MCU 產品組合。

那這有什麼問題呢？雖然擁有這麼多優點，但切換頻率上升可帶來一些缺點和設計挑戰。以圖騰柱 PFC 為例，縮小電感器體積會造成其他控制挑戰，例如增加死區產生的第三象限損耗。C2000 即時 MCU 的獨特功能組合可透過以下特性處理這些問題：

- C2000 即時 MCU 可提供 150-ps 高解析度死區，能夠更精確的放置邊緣並減少不必要的第三象限損耗。於以下應用報告中進一步了解 TI GaN 的第三象限運作「[GaN 是否有本體二極體？- 了解 GaN 的第三象限運作](#)」
- 如前面所述，TMU 可提供主動式死區控制機制，透過加快運算速度進一步減少損耗。

看看這些功能在具 98.75% 峰值效率與少於 2% THD 的 [3.3kW 雙向交錯式 CCM 圖騰柱 PFC 參考設計](#)中之實際作業情形。

減少圖騰柱 PFC 中的輸入電感器會增加零相交點之電流突波，並對總諧波失真造成負面影響。電流突波增加會在輸入波形切換正半波與負半波時發生，並在同步與主動式 FET 反轉時造成突入電流。突入電流主要由電感器中電壓累積和 FET 與二極體輸出電容而造成。C2000 即時 MCU 透過精密的遮蔽負載機制，讓 MCU 可在最小 CPU 負擔下執行軟啟動演算法，進而處理這些問題。

最後，整合式類比的速率與平行度是提升數位微控制器中控制環路頻率的基礎。若沒有此基礎，就無法以整合式驅動器實現 TI GaN 裝置的完整優點。F28002x 系列有多達 16 個個別類比通道，這些通道連接至 2 個獨立類比數位轉換器，每個通道都

可提供絕佳性能，其中包含 2 個最低有效位元 (LSB)、積分非線性 (INL)、1 LSB 微分非線性 (DNL)，以及在高達 3.45 每秒百萬次取樣 (MSPS) 的速率下提供 11 位元有效位元數。由於轉換觸發啟動方式靈活並與 PWM 單元密切結合，也允許進行調整以獲得最佳即時控制策略，因此執行多個 ADC 規格可同時進行多個回饋來源取樣。例如您可同時測量 AC 電網的線電壓與中性電壓，提高控制環路執行速度並提供系統準確度。

在 GaN 推動更高效率標準與功率密度要求的實現能力時，新挑戰也會隨之出現。C2000 即時微控制器經過獨特設計，可處理減少磁層與提高系統頻率時，所產生的固有控制問題。

C2000 即時 MCU 與 TI GaN 間的介接

C2000 即時 MCU 與 GaN 裝置間的介面包含數位隔離器，例如下方圖 3 中所示的 ISO7741-Q1。此隔離裝置可幫助抑制瞬態雜訊，並保護 C2000 即時 MCU。微控制器、隔離與 GaN 裝置都是介面的必要元件。

TI 數位隔離器具備高達 5.7 kVrms 的高隔離額定值，支援速度最高可達 150 Mbps，非常適合 C2000 即時 MCU 與 GaN FET 間的隔離層。其可提供所需的速度與低延遲，在裝置間建立精確控制與回饋路徑。

控制

GaN FET 控制透過高解析度 PWM 模組執行，可在

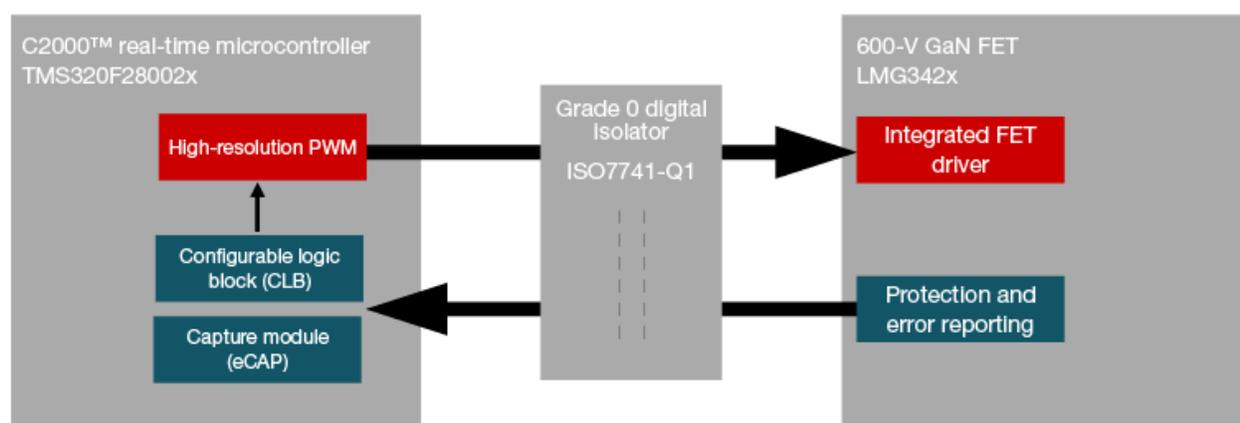


圖 3。C2000 MCU 與 TI GaN 裝置介接時唯一所需的元件。

PWM 的時間、工作週期、相位與死區提供 150-ps 解析度控制。PWM 輸出具備整合式跳脫區子模組，可在無 CPU 介入下，於 25 ns 內對回饋進行回應。

意見反應

C2000 即時微控制器整合獨特的週邊設備組，從 TI GaN 裝置 (包含最近推出的 LMG3425R030) 進行回饋訊號取樣，無需使用額外離散式元件。回饋來自兩個主要來源：

- **故障報告**。LMG3425R030 會對其故障資訊進行編碼。由於與軟體中故障處理相關延遲，在軟體中進行資訊解碼可能存在風險。若要取得較快回應，您可在外部將故障訊號結合到裝置，但此舉必須使用離散式元件。C2000 即時 MCU 運用其可配置邏輯區塊 (CLB) 來讀取、處理及回應 GaN 裝置產生的故障情況，無需使用軟體和外部元件，即可達到最佳性能並降低系統成本。
- **溫度監控**。LMG3425R030 裝置的溫度監控輸出會成為固定頻率可變工作週期訊號。一般執行需要使用外部濾波器，以執行需 ADC 取樣的 PWM 式 DAC。C2000 即時 MCU 的強化式擷取模組可完全省去外部元件，並且可在無 CPU 負擔下擷取溫度資訊，進而達到最佳成本並節省電路板空間。

結論

在現代數位電源系統中，效率與功率密度標準代表一系列重大挑戰。TI GaN 裝置可提供可靠且可負擔的技術，並提升功率密度與效率。ISO7741-Q1 可提供符合成本效益的介面，C2000 即時 MCU 則可處理與現今複雜控制機制相關的難題。這些裝置彼此協調合作，為現代數位電源系統提供靈活又簡單的解決方案，此外仍可提供尖端功能，以實現最安全、最功率密集且有效率的數位電源系統。

開發人員現在可躍入電源效率與功率密度的新世代。為了讓此旅程更加容易，TI 將 25 年即時數位電源控制、電力電子、硬體與軟體相關經驗，整合在經過完整

測試與記錄的參考設計中。

其它資源

- 參考設計
 - [使用 C2000 即時 MCU 參考設計的雙向高密度 GaN CCM 圖騰柱 PFC](#)
 - [具高效率的 1.6-kW 高密度 GaN 式 1-MHz CrM 圖騰柱 PFC 轉換器參考設計](#)
 - [高效率 GaN CCM 圖騰柱免橋接 PFC 參考設計](#)
 - [運用 C2000 即時 MCU 的 Vienna 整流器式三相功率因數校正參考設計](#)
- 白皮書
 - [在使用情況下驗證 GaN FET 對電力線突波可靠性之新作法](#)
 - [如何減少圖騰柱 PFC 在 AC 零相交點之電流突波](#)
- 訓練課程
 - [C2000 數位電力訓練系列](#)
 - [CLB 訓練系列](#)
- 評估套件
 - TMS320F28002x controlCARD 評估模組：<https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280025C>
 - LMG3422R030 600-V 30-mΩ 半橋子板：<https://www.ti.com/tool/LMG3422EVM-043>
 - ISO7741-Q1 評估模組：<https://www.ti.com/tool/ISO7741EVM>
- 軟體工具
 - [C2000Ware MATLAB® VisSim Embedded Coder](#)

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前未取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

平台列、HotRod 及 PowerCSP 是德州儀器的商標。所有其它商標皆屬於其各自所有者之財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, or other requirements. These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to TI's Terms of Sale (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2021, Texas Instruments Incorporated