

電 子 零 組 件 雜 誌

B5G 全面智慧互聯

2023 五月號

vol.378

ISSN 1019-8628



定價180元

數位轉型

P.44 創新數位商業模式 數位原生企業方興未艾

專題報導

P.48 電氣化趨勢不可逆 寬能隙技術助電動車市場躍升



P.42 把視野之外的資訊帶到你的眼前

靈感由此開始



從上百萬款零件現貨到尖端技術資源，
我們能滿足您的各項需求，將靈感轉變成創新。

獲得啟發，就前往 digikey.tw，或來電 0080-185-4023。





讓 dsPIC33C MPT 系列 Secure DSC 保護您的嵌入式應用

輕量級 MCU 集成了重量級的安全防護子系統

利用我們的 dsPIC33C MPT 系列安全數位訊號控制器 (Secure DSC) 保護和維護您的系統完整性，此系列配有採用 JIL 高評等 HSM 架構的整合安全子系統，可提供先進的加密引擎演算法和安全金鑰儲存。這些控制器符合 EVITA 完整規範，可滿足汽車、工業、醫療和物聯網設計中的安全要求。dsPIC33C MPT Secure DSC 支援 AUTOSAR 和功能安全，能夠以 100 MHz 的工作頻率提供即時處理能力，並且擁有豐富的周邊裝置組，非常適合需要執行時間和安全關鍵型功能的嵌入式應用。針對數位電源、電機控制、無線電源、進階感應和控制、可靠的電容式觸控及一般高效能嵌入式應用，我們的 dsPIC33C MPT 系列 Secure DSC 是最佳選擇。這些 Secure DSC 支援實現以下穩健的安全使用個案：

主要特性

- 安全啟動
- 安全的韌體升級
- 安全板載通訊或訊息驗證
- 電子控制單元 (ECU) 驗證
- WPC Qi® 1.3 無線充電器驗證
- IP 保護
- 網路驗證與工作階段管理
- X.509 憑證驗證與儲存
- 產品生命週期管理

聯繫信息

Microchip 台灣分公司
電郵：rtc.taipei@microchip.com
聯絡電話：• 新竹 (03) 577-8366

技術支援專線：0800-717-718
• 高雄 (07) 213-7830 • 台北 (02) 2508-8600



microchip.com/Ctimes-Secure-DSC

Microchip 的名稱和徽標組合以及 Microchip 徽標
均為 Microchip Technology Incorporated
在美國和其他國家或地區的註冊商標。
在此提及的所有其他商標均為各持有公司所有。
© 2023 Microchip Technology Inc. 及其子公司。
保留其版權及所有權利。

CONTENTS

封面故事

B5G全面 智慧互聯

24

2030年後迎接B5G/6G時代
你今天5G了嗎？

季平

30

優化5G通訊
智慧車輛發展脈絡現蹤
B5G加速車聯網應用落地

王岫晨

36

5G在工業應用前景與現況
為實現IIoT而生

盧傑瑞

6

編輯室報告

新地球

8

矽島論壇

去全球化風潮下，
半導體供應鏈跨國佈局競爭力

潘建光、洪春暉

42

新東西

影像擴景近眼顯示光學準系統

把視野之外的資訊帶到你的眼前

藍貴銘

60

產業視窗

笙泉：無線化趨勢明確

加速佈局32位元MCU與類比電源方案

王岫晨

22

7

35

75

62

64

新東西索引

電子月總匯

產學技術文章導讀



適用於現代化高精密性感測應用

AVR® EA 微控制器系列

AVR® EA 微控制器可輕鬆將智慧控制整合到具有類比感測器的嵌入式系統中，專門設計的 MCU 提供 12 位元差分 ADC (具有整合可程式化增益放大器)、10 位元 DAC 和內建比較器，能夠在與類比元件連接時表現出極高的彈性。

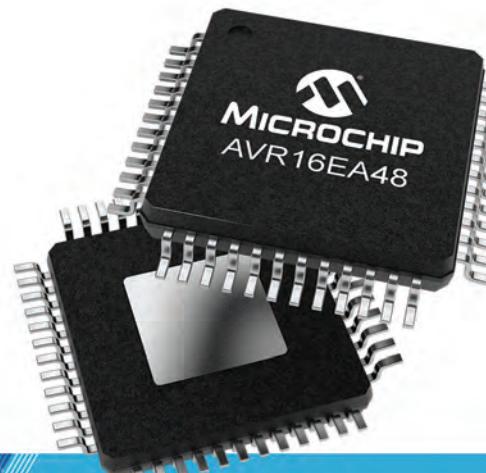
AVR EA 系列與功能強大的 AVR CPU 和「核心獨立」的數位周邊裝置結合使用，可協助您打造內建彈性且系統成本更低的小巧設計。

主要特性

- 執行頻率最高 20 MHz 的 AVR CPU
- 具有專用邊寫邊讀 (RWW) 區段的 16-64KB 快閃記憶體
- 2-6KB SRAM
- 512B EEPROM
- 28 至 64 接腳 SPDIP、SSOP、TQFP 和 VQFN 封裝
- 標準和延伸溫度等級：-40°C 至 85°C 與 -40°C 至 125°C

聯繫信息

Microchip 台灣分公司
電郵：rtc.taipei@microchip.com
技術支援專線：0800-717-718
聯絡電話：
• 新竹 (03) 577-8366 • 高雄 (07) 213-7830 • 台北 (02) 2508-8600



CONTENTS

產業觀察

10

多柱型零磁場閘極輔助SOT-MRAM元件
創新SOT-MRAM架構 提升新一代底層快取密度
imec

16

【Edge AI專欄】
AI晶片發展歷史及最新趨勢
Jack OmniXRI

44

數位轉型-數位原生企業

靈活應對市場
創新數位商業模式 數位原生企業方興未艾
王岫晨

48

專題報導-寬能隙半導體

顯而易見的優勢
電氣化趨勢不可逆 寬能隙技術助電動車市場躍升
王岫晨

52

焦點議題

從電網與充電技術看市場現況
電動車自宅充電能有普及的一天？
丘燕

56

量測專欄-車用雷達

未來汽車不可或缺
實現自動化駕駛 車用雷達測試大解密
王岫晨

汽車LED驅動器功率轉換拓撲指南

Joshua Caldwell

SAR ADC原理及
其驅動電路設計分析

Barley Li

PyANSYS模擬工具技術教學(一)
使用PyANSYS探索及優化設計

林鳴志

66

關鍵技術報告 能源技術

70

76

CTIMES 零組件雜誌

Founded from 1991

社長 / 黃俊義 Wiliis Huang

編輯部 /
副總編輯 鈦貴銘 Korbin Lan
資深編輯 王岫晨 Steven Wang
助理編輯 陳復霞 Fuhsia Chen
採訪編輯 陳念舜 Russell Chen
美術編輯 陳宇宸 Yu Chen
企劃編輯 劉昕 Phoebe Liu

CTIMES 英文網 /
專案經理 兼主編 鈦貴銘 Korbin Lan

產業服務部 /
經理 曾善美 Angelia Tseng
主任 翁家騏 Amy Weng
主任 曾郁期 Grace Tseng
產服特助 劉家靖 Jason Liu

整合行銷部 /

發行專員 孫桂芬 K.F. Sun
張惟婷 Wei Ting Chang

管理資訊部 /
會計主辦 林寶貴 Linda Lin
法務主辦 顏正雄 C.S. Yen
行政專員 張惟婷 Ting Chang

發行人 / 黃俊隆 Robert Huang
發行所 / 遠播資訊股份有限公司
INFOWIN INFORMATION CO., LTD.
地址 / 台北市中山北路三段 29 號 11 樓之 3
電話 : (02) 2585-5526
傳真 : (02) 2585-5519

行政院新聞局出版事業登記證
局版北市字第 672 號
中華郵政台北雜字第一四九六號
執照登記為雜誌寄
國內總經銷 聯華書報社
(02) 2556-9711
紐約總經銷 世界日報 世界書局
洛杉磯總經銷 洛杉磯圖書部
舊金山總經銷 舊金山圖書部
零售商 全台誠品書店及各大連鎖書店均售
郵政戶名 遠播資訊股份有限公司
郵政帳號 16854654
國內零售 180 元
訂閱一年 1800 元
國內掛號 一年加收 250 元掛號費
國外訂閱 普通 : 港澳 2800
亞太 3150
歐美非 3400

深度佈局 電動車應用與產業鏈研討會

■ 2023 6/15 (四)

● 13:00~16:40

● 台大醫院國際會議中心

時間	議題	講師
12:30~12:55	報到	
12:55~13:00	Opening	
13:00~13:50	車載電子照後鏡 & ROHM (LAPIS) 影像處理 IC應用介紹	ROHM 資深工程師 俞復中
13:50~14:40	如何在汽車電子設計中 兼顧安全、高效和 可靠性	Littelfuse 資深技術行銷工程師 游恭豪
14:40~15:00	Break time 廠商交流時間	
15:00~15:50	台灣電動車充電解決方案 市場現況與未來發展	裕電偉電 YES Charging 系統開發部部長 解睿凱
15:50~16:40	全球電動車產業鏈的 完整佈局與新商機 (待確定)	工研院 產業科技國際策略發展所 美洲產業研究組副組長 石育賢
16:40~17:00	抽獎	

抽獎禮

Ida drone-yuki Plus
意念空拍機



NR1
空氣淨化項鍊



問卷禮

車用充電器
USB+TYPE-C



圖片僅供參考，產品以實際物品為準
(數量有限送完為止)

主辦單位

CTIMES

零组件雜誌
智動化
SmartAuto

協辦單位



TIA
臺灣車聯網產業協會

合作夥伴

ROHM
SEMICONDUCTOR

Littelfuse

Weblink
展碁國際

FUTURE LAB

OMRON

報名方式：線上報名<https://www.ctimes.com.tw>
報名洽詢：02-2585-5526分機225孫小姐
傳真：02-2585-5519
e-mail：imc@ctimes.com.tw



免費報名

注意事項：

- 一般免費活動，將由主辦單位進行出席資格審核，通過審核後您將於活動日期前三日收到報到通知信函。
- 請於活動當日報到時，以紙本或螢幕出示通知信函中之報到編號，以快速完成報到。
- 活動當天，若報名者不克參加，可指派其他人選參加，並請事先通知主辦單位。
- 若因不可預測之突發因素，主辦單位得保留研討會課程主題及講師之變更權利。
- 活動若適逢颱風達放假標準等天災之不可抗拒之因素，將延期舉辦，時間則另行通知。



新地球

相較於4G通訊，5G技術具有高速傳輸、超低延遲、巨量連結等特性，賦予更多智慧應用的可能性，如自駕車、智慧醫療、智慧工廠、智慧城市等，有助未來產業數位轉型，甚至改變人們的生活方式。不過，相較於4G時代，5G讓人很無感，不論是從5G手機滲透率或5G毫米波的技術應用面來看都沒有驚喜，或許是因為5G發展時間尚短也未可知。

從4G、5G到6G世代，行動通訊幾乎是每一個十年就會帶來重大變革，比方4G世代帶來新服務和新體驗，開啟民眾對數位生活的想像與應用；5G世代改變產業型態，走向萬物聯網時代。在持續深化5G滲透率與應用下，Beyond 5G(B5G)已經開啟眾人對6G世界的想像。本期《封面故事》『B5G全面智慧互聯』探討從5G技術現有的缺陷，到B5G的出現來優化現有的5G通訊應用，包括如何為車聯網與工控市場帶來更巨大的優勢，並放眼未來6G通訊的可能性。

現今全球的汽車市場，汽車動力系統正從內燃機轉向電動機，這是一個不可阻擋的趨勢。電動車增加了四、五類新的電子模組，每種電子模組所包含的電子元件數量相當多，這對於半導體供應商來說將帶來龐大的商機。而寬能隙半導體材料在功率利用和開關頻率方面具有獨特的優勢，因此能夠實現電動車的發展目標。《專題報導》從『電氣化趨勢不可逆 寬能隙技術助電動車市場躍升』談起，分析電動車的全球革命，並討論碳化矽和氮化鎵這些寬能隙材料，如何為電動車帶來更大的優勢。

而在這個強調數位化轉型的時代，衍生出一種數位原生企業的概念。數位原生企業是以數位科技為基礎，透過數位平台來運行的企業。這是由於今天的數位科技快速發展且加速普及，讓企業不得不思考如何利用數位科技來提升競爭力並應對市場變化。數位原生企業也在創立之初，就注重數位科技的應用，因此在產品、市場、客戶體驗和流程上更容易運用數位科技來創造價值。本期《數位轉型專欄》將介紹『創新數位商業模式 數位原生企業方興未艾』的企業發展現況，歡迎有興趣的讀者鎖定。

從5G發展到6G，從燃油汽車過渡到電動車，從傳統企業轉型到數位原生企業，這個世界正在重新塑造一種全新的樣貌，讓人忍不住想探究未來的世界，究竟會是什麼模樣。或許答案就像是本期封面那樣，有了這些新技術的加持，未來將會是一個全面聯網、高度數位化的新地球，令人嚮往。

世邁新款T6CN PCIe NVMe SSD固態硬碟產品系列更高性能和容量



世邁科技（SMART Modular）宣佈其SMART RUGGED產品組合推出全新T6CN PCIe NVMe SSD固態硬碟產品系列，有助於系統設計工程師獲得更高的性能和容量，以滿足客戶不斷變化的系統需求。

T6CN固態硬碟適用於超高性能資料中心，及需求高度安全與堅固耐用的國防、工業和電信應用。T6CN提供M.2 2280、E1.S和U.2規格，並且相容於PCIe Gen 4.0 NVME規格，與當前的SSD技術比較，可以提供更快的讀取、寫入、資料傳輸和操作速度。

就儲存容量來說，M.2規格提供960GB至3,840GB容量，E1.S規格提供960GB到7,680GB，而U.2版本則可提供960GB到16,360GB容量。

艾邁斯歐司朗新光電二極體TOPLED D5140 SFH 2202降低環境光干擾造



艾邁斯歐司朗推出了新型光電二極體TOPLED D5140 SFH 2202。與現有的標準光電二極體相比，這款光電二

極體效能更加出眾，對光譜綠色部分的可見光具有更高的靈敏度，同時線性度也更高。這些強化的功能可以明顯降低環境光干擾造成的影響，使接收到的光學訊號品質更高，協助智慧手錶、運動手環及其他可穿戴設備能夠更精確地測量心率和血氧飽和度（SpO₂）。

艾邁斯歐司朗的內部測試顯示，藉由光電二極體晶片製程技術的優化，TOPLED D5140 SFH 2202在紅外光譜中的線性度比標準光電二極體高出30倍。此外，實驗資料表明，在光電容積描記法（PPG）心率測量所用的綠光波長下，其靈敏度明顯更高。

意法半導體高容量STM32U5 MCU系列晶片獲NIST嵌入式亂數熵源認證



意法半導體（STMicroelectronics，簡稱ST）宣佈，其市場領先的STM32微控制器（MCU）產品家族再擴陣容，推出新款STM32U5晶片，降低功耗的同時提升性能，並延長了續航時間。STM32U5產品已獲得NIST嵌入式亂數熵源認證，是業界首款獲此認證的通用型MCU。

這款STM32U5 MCU將程式碼和資料儲存容量擴充到128KB快閃記憶體，適合具成本考量的應用，同時還針對複雜應用和與智慧型手機相似的使用者介面增加了高容量版。其整合4MB快閃記憶體和2.5MB SRAM STM32U59x/5Ax是迄今為止STM32 MCU全系產品中晶片上記憶體容量最大的產品。

新STM32U5 MCU具備更強大的功能，可強化深度嵌入式應用的能力，如環境感測器、工業致動器、大樓自動化、智慧家電、穿戴式裝置、電動汽車控制等，特別是安裝在遠端，以及位在難以接觸的設備。

Molex I-PEX MHF 4L LK和MHF 1 LK電纜組件 提升連接可靠性和安全性



Molex（莫仕）宣布擴展電纜組件產品線，增加高頻和高速傳輸連接器廠商I-PEX的創新解決方案。雙方攜手提供I-PEX MHF 4L和MHF 1 LK電纜組件，備有使用MHF標準插座和Molex RF連接器介面的多種配置型號。

MHF 1系列小型射頻同軸連接器系統利用I-PEX的專利鎖扣結構，提升連接可靠性和安全性。該尖端解決方案無縫嵌入到位，可抵受連續的衝擊和振動，保持可靠的訊號連接。該專利鎖扣系統受無人機操作的啟發，非常適合滿足汽車、消費性電子、資料中心、醫療、智慧家電和電訊產業等領域最嚴格的連接需求。

Molex射頻連接產品經理Donna Wallburg表示，Molex與I-PEX攜手合作，包括提供一站式解決方案來源，以滿足最嚴苛的射頻應用，同時滿足不斷成長的射頻電纜組件需求。



洪春暉

資策會產業情報
研究所(MIC)所長



chrishung@micmail.iii.org.tw

去全球化風潮下 半導體供應鏈跨國佈局競爭

白 2018年中以來，全球高科技產業面臨巨變，除了美中貿易衝突導致生產聚落轉移，影響全球運籌之外，COVID-19疫情、美中科技競爭、區域戰爭風險，以及新興科技應用等多元因素，皆影響科技大廠之營運，導致各主要國家紛紛調整經貿與產業政策，以因應全球環境的急遽變化，形成去全球化的風潮，使企業面臨更複雜的國際競爭與合作態勢。本文將探討半導體未來熱門的新興應用及供應鏈跨國佈局。

其實補助政策並非發展半導體產業的萬靈丹，以中國為例，除了「十三五計畫」、「十四五計畫」的大力推動外，更成立大基金強化投資整併，但在耗費巨資後，卻未能在半導體占據關鍵地位。在進入門檻和退出成本皆高的晶圓製造領域，主要半導體業者擴廠動作宜配合市場需求變動之節奏。尤其在短、中期間，資通訊產品市場能否恢復成長動能，新興晶片應用能否快速擴大，都是影響長期新投資建廠的晶圓產能維持穩定營運的關鍵因素。

而新興應用能否有效帶動半導體需求，尤為關鍵。諸如自動駕駛／電動車、人工智慧、新世代通訊等，皆為各國產業政策所關注的重要科技方向，也是跨國企業鎖定的潛力市場商機，更是各國產業政策挹注與競爭的兵家必爭之地。

例如美國即透過頒布削減通膨法案，對國產電動車給予價格補貼，但卻不利海外電動車

廠的競爭，已引起各國爭議。歐盟亦基於隱私保護法規而規範境內數據的蒐集與使用，將影響跨國企業在歐盟當地的人工智慧應用布局。日本Rapidus計畫生產使用於自動駕駛、人工智慧等用途的次世代邏輯晶片。在此發展趨勢下，未來美國、歐盟和日本亦可能在自動駕駛、人工智慧等領域展開競爭，更甚於合作。

若就未來熱門的新興應用如自動駕駛、人工智慧等領域觀之，不但美中兩國投入，其他主要國家也積極挹助政策資源。但不同於資通訊產品具有全球共通產業技術標準，各國政策將主導自動駕駛或人工智慧的使用機制與數據運用等相關法規，從中創造或營造適合當地環境的應用平台。

因此，雖然各國政策投入欲發展自主半導體產業，但各國產業政策成敗的關鍵，卻在半導體產品的出海口—新興應用市場。

對於半導體與資通訊業者而言，在此波新航海時代中，除了順應趨勢進行跨國佈局外，更應深度思考各國多元化的應用環境，順勢配合各國政策進行在地化，甚至與當地業者合作，或可藉此掌握當地市場商機，進一步減緩因跨國佈局所帶來的效率損失衝擊，甚至打造新的競爭力來源。

(本文為潘建光、洪春暉共同執筆，潘建光為資策會MIC資深產業分析師)

AM65100F

歡迎蒞臨南港展覽館一館4樓 L1225a 展位

地球暖化，減少排放二氧化碳跟節約能源已經成了重要的社會問題，綠色能源科技發展也成為重要的課題。

在汽車，鐵路和以智慧電網為中心的新網路基礎設施等領域中，提升能源使用效率是不可缺少的。

安傑特科技致力於研究開發可顯著提高電能轉換效率的功率半導體，努力為社會做出貢獻。

我們與日本，台灣，美國的晶圓代工廠合作，設計出最適合各種應用的功率器件（Si，SiC，GaN等）。

Key features

- Low on-resistance $R_{DS(on)}$
- Best thermal conductivity and behavior
- High speed switching
- Low capacitances and low gate charge
- Low gate resistance for high-frequency switching
- Easy to parallel
- Pb-Free, Halogen Free, RoHS Compliant

Configuration



Circuit Diagram

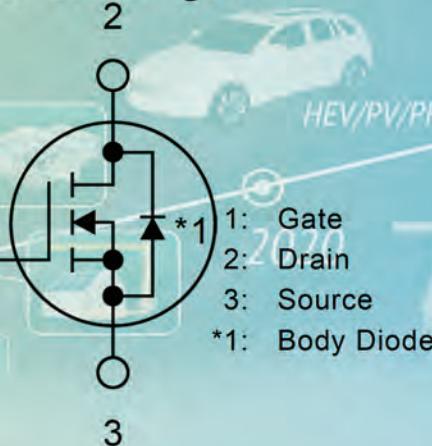


Figure1. Drain - Source Voltage: V_{DS} (V)

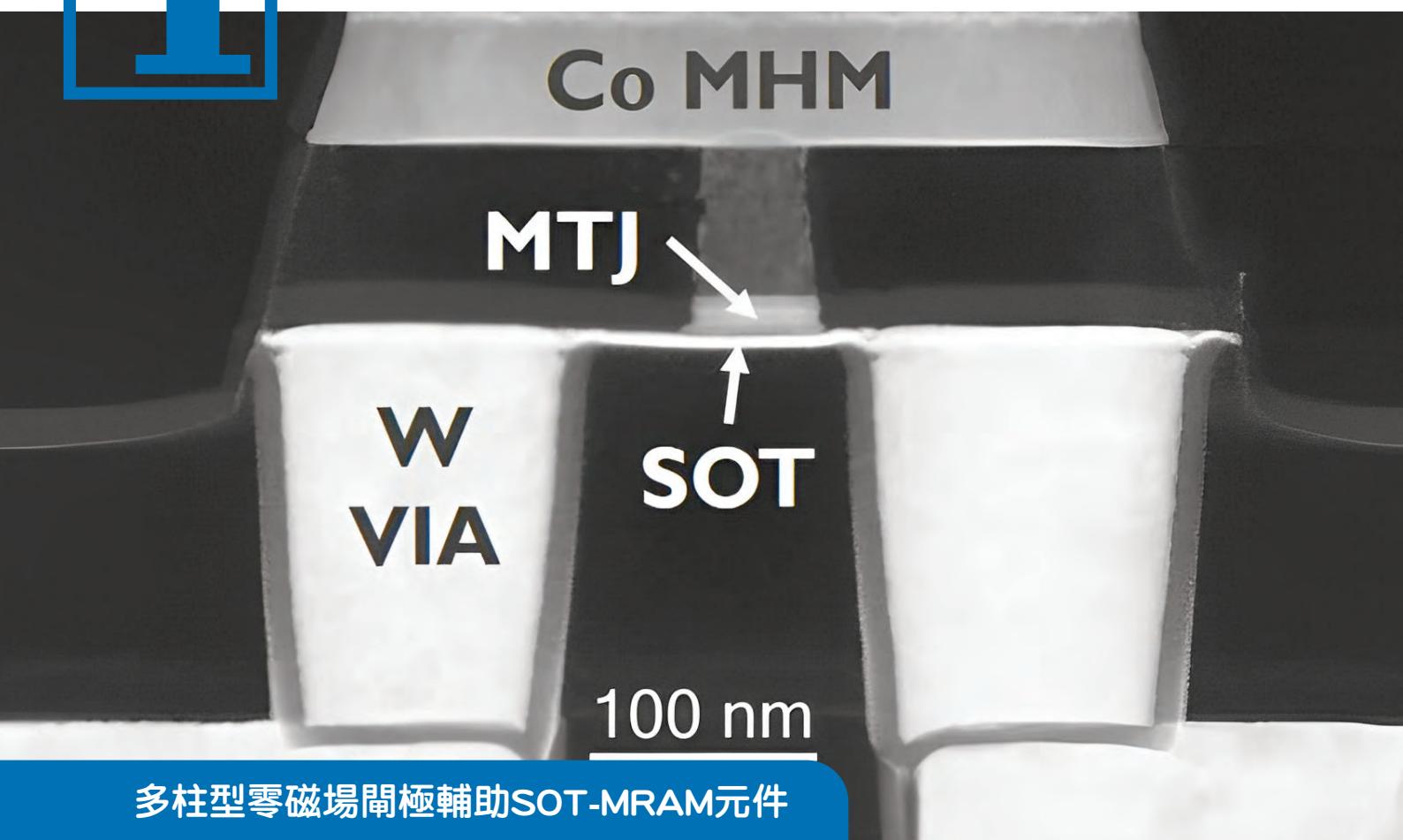
Figure2. Drain - Source Voltage: V_{DS} (V)

Target Application Applications

Switching mode power supply

- PV inverter
- Uninterruptible Power Supply
- Motor Drives
- DC/DC converters
- EV charging





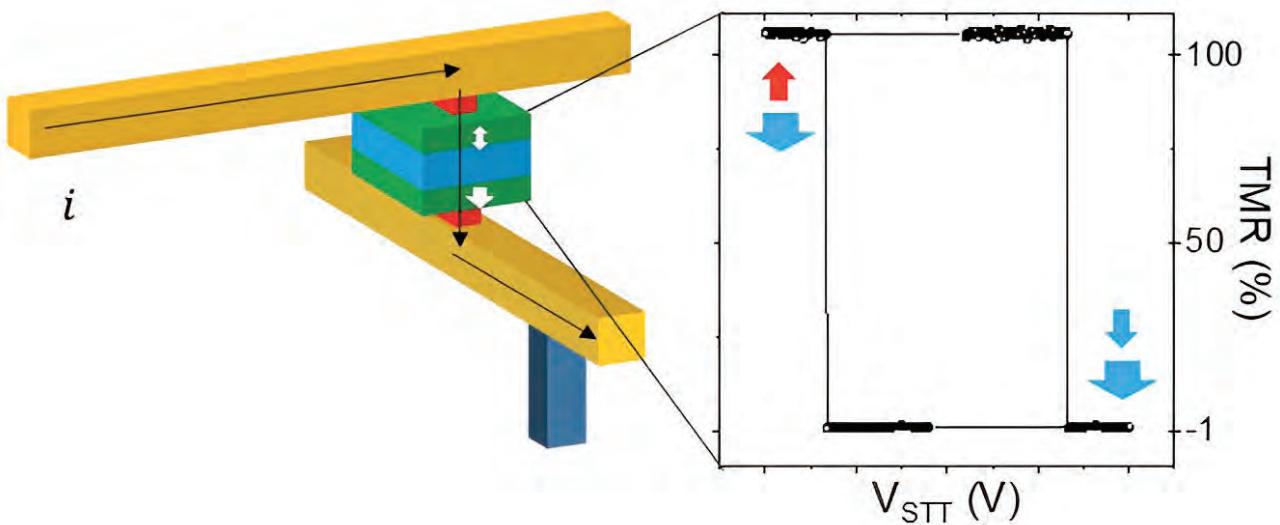
多柱型零磁場閘極輔助SOT-MRAM元件

創新SOT-MRAM架構 提升新一代底層快取密度

要將自旋軌道力矩磁阻式隨機存取記憶體（SOT-MRAM）用來作為底層快取（LLC），目前面臨了三項挑戰；微縮性、動態功耗，以及可供量產且尺寸緊湊的零磁場磁矩翻轉技術。比利時微電子研究中心（imec）在2022年IEEE國際電子會議（IEDM）上提出一套創新的SOT-MRAM架構，能夠一次解決這些挑戰。

文／imec；編譯／吳雅婷

近年來，SOT-MRAM技術的開發熱度在半導體業攀升。SOT-MRAM是一種非揮發性記憶體，具備優良性能，適合用來當作嵌入式記憶體，例如高效能運算與行動裝置的三級（L3）與四級以



▲ 圖一：MRAM穿隧磁阻在讀取資料時的運作原理：上層綠色為固定層（RL），下層綠色為自由層（FL），藍色為氧化鎂（MgO）介電層， i 為讀取電流。

上快取記憶體。目前的快取記憶體通常採用具備極速讀寫能力的揮發性SRAM元件。

然而，由於微縮限制，SRAM難以持續擴充位元密度，使得開發人員不得不尋求替代元件。此外，在非運作狀態下，SRAM儲存單元的散熱問題越來越嚴重，導致待機功耗增加。MRAM等非揮發性記憶體不僅有望縮小儲存單元的尺寸，利用其非揮發性，還能解決待機功耗的問題。

SOT-MRAM性能亮點： 奈米級開關速度、耐久重複讀寫

SOT-MRAM由技術成熟度較高的自旋轉移力矩磁阻式隨機存取記憶體（STT-MRAM）發展而來，由於耐久性更佳，開關速度更快，因此在快取記憶體的應用潛能更大。這兩種MRAM記憶體單元的「核心」都是磁性穿隧接面（magnetic tunnel junction；MTJ）。

該接面包含一層鈷鐵硼（CoFeB）固定鐵磁層與一層鈷鐵硼（CoFeB）自由鐵磁層，兩者之間包含一層氧化鎂（MgO）介電薄膜。資料寫入透過轉換自由層的磁性來實現，自由層即MRAM記憶體單元的「儲存」層。資料讀取則是利用流經磁性穿隧接面的電流，測量該接面的磁阻大小來實現。

該穿隧磁阻（tunnel magnetoresistance；TMR）的高低由自由層與固定層的磁矩方向來決定，也就是說，如果兩個鐵磁層的磁矩平行且同向，則為1，若為平行但反向，則為0。

STT-MRAM與SOT-MRAM的主要差異在於寫入電流的幾何設計。STT-MRAM的寫入電流垂直於磁性穿隧接面，SOT-MRAM則採用平面設計，將寫入電流注入鄰近的元件底層（SOT layer）內，通常是諸如鎢（W）等重金屬。

因此，在SOT-MRAM設計中，讀取與寫入為不同路徑，進而大幅提升元件的耐久性與讀取穩定性。從平面方向注入電流還能解決STT-MRAM的開關延遲問題。2018年，imec首次展示可靠的SOT-MRAM元件，翻轉速度降至210ps，讀寫循環次數高達 5×10^{10} 次以上，功耗僅需300pJ。

SOT-MRAM未來挑戰： 縮小尺寸、降低電流、量產技術

SOT-MRAM具備非揮發性，所以在高儲存密度下，待機功耗比SRAM還要低上許多。然而，由於寫入電流較大，動態功耗也相對較高。

另外，為了在嵌入式記憶體應用，與SRAM實際一較高下，SOT-MRAM需要在擴充儲存密度方面創新發展。不同於傳統的平面式磁化設計，而在固定層與自由層導入垂直型磁性穿隧接面（p-MTJ），記憶體單元的構形就能不再限於矩形，進而釋放更大的微縮潛能。

雖然如此，這項技術發展的癥結仍是元件架構。採用柱狀設計的STT-MRAM元件具備兩極（two-terminal）結構。在記憶體陣列中，每個磁性穿隧接面僅需一個選取元件來定址待讀取或待寫入的儲存單元，該元件通常是（存取）電晶體。SOT-MRAM的讀取與寫入路徑不同，因此是三極（three-terminal）結構元件。在此情況下，每個儲存單元需要兩個存取電晶體，分別負責讀取與寫入資料。因此，儘管區分讀取與寫入路徑可以提升元件可靠性，但也因為增設了一個電晶體而需更多的佈線空間。

另一個難題是量產技術。2018年，imec展示了

SOT-MRAM元件模組的全面整合方案，採用12吋晶圓CMOS製程，藉此促進業界採納。但是要在SOT-MRAM導入垂直型磁性穿隧接面其實有個難點，就是在寫入資料時必須另設一個平面磁場。該磁場是用來破壞元件的結構對稱性，以確保磁矩會翻轉。

換言之，若無此磁場，就無法在啟動寫入電流後控制自由層的磁化方向。在SOT-MRAM的研發階段，可以透過施加外部磁場來實現，但最終的元件設計必須在有限的元件空間內自行產生穩定的磁場。

關鍵優化步驟

到目前為止，迎擊上述各項挑戰的解決方案已經順利亮相，其中幾項技術由imec領先展示於12吋晶圓製程。

在處理元件底層（SOT layer）圖形化的硬遮罩嵌入一層鐵磁材料，就能透過材料內部的自旋軌道交互作用來控制磁矩方向，而無需外部磁場。鐵磁層可以誘發感應，在磁性穿隧接面的自由層上產生一個小型的平面均勻磁場。2019年，imec的展示說明了這項零磁場磁矩翻轉技術具備可靠性，還能將SOT-MRAM元件的寫入時間降至奈秒以下。

寫入電流增加所帶來的問題可以透過閘極電壓（voltage-gate；VG）輔助方法來緩減。在VG-SOT-MRAM元件中，自由層磁矩的翻轉同樣是利用自旋軌道力矩（SOT）作用，透過平面電流來改變磁矩方向。但多了個由電壓控制磁異向性（voltage-controlled magnetic

anisotropy；VCMA）的閘極作為輔助，利用在穿隧阻障層形成的磁場來降低能障。如此一來，寫入資料所需的電流就會變小，進而降低動態功耗。

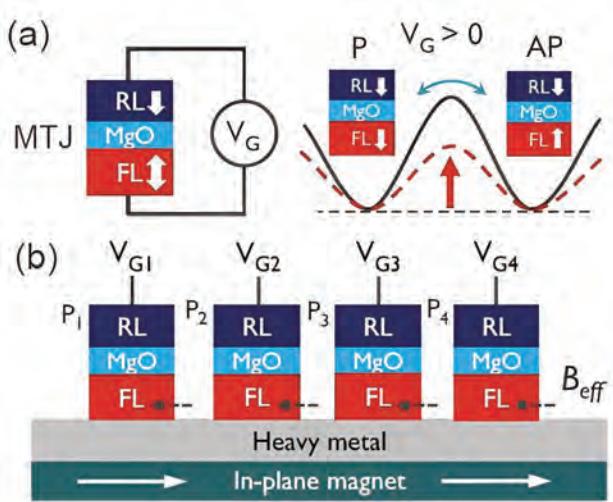
採用電壓閘極輔助設計還能有助於實現多柱型或多位元的元件設計。之前每個金屬底層只能連接一個柱型磁性穿隧接面，現在可以連接四個以上。在多柱型、多位元的元件設計下，透過VCMA閘極施加的電壓就能選取所需的磁性穿隧接面（即位元），進而降低能障，方便磁矩翻轉。共用金屬底層的四個磁性穿隧接面僅需一個（大型）電晶體，而非四個電晶體，使得記憶體單元的整體尺寸更為緊湊。

然而，這些零磁場解決方案至今仍未與多柱型設計完全整合。舉例來說，如先前所述，零磁場磁矩翻轉技術需要在每個垂直型磁性穿隧接面（p-MTJ）嵌入鐵磁層，這就大大折損元件微縮的可能性。

整合解決方案： 多柱型零磁場閘極輔助SOT-MRAM

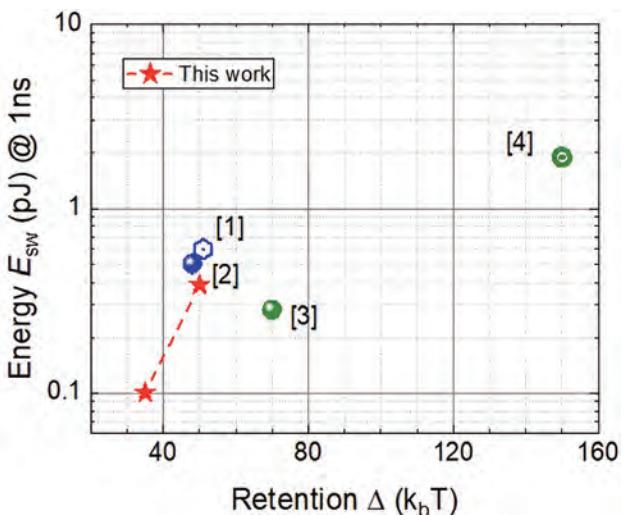
在2022年IEEE國際電子會議（IEDM）上，imec展示了具備完整功能的創新SOT-MRAM元件，一次解決上述所有技術難題。

第一，採用可擴充的零磁場解決方案，方法是在元件底層導入一層平面的磁性材料，作為異質材料自旋作用的來源。這層共用的磁性材料與不同的磁性穿隧接面進行耦合，提供各個記憶體單元所需的磁場，但又不屬於任何一個，進而提升元件的微縮性。



▲ 圖二：多柱型元件與電壓控制磁異向性（VCMA）作用的示意圖：(a) 閘極電壓能調整磁矩翻轉時的能障；(b) 採用異質材料的元件底層能在多柱型元件實現零磁場翻轉。（於2022年IEEE國際電子會議展示）

第二，利用電壓控制磁異向性（VCMA）作用來協助調整與降低寫入資料所需的電流，促使磁矩順利翻轉，最終降低所需能耗。



▲ 圖三：上方曲線圖顯示不同零磁場元件的每奈秒（ns）能耗與資料保存能力。與其它參考元件相比，具備異質底層的元件效率更高。（於2022年IEEE國際電子會議展示）