

寬能隙功率半導體應用之節能潛力探討

柴蕙質

核能研究所-綜合計畫組研發策略研究室

2022/10

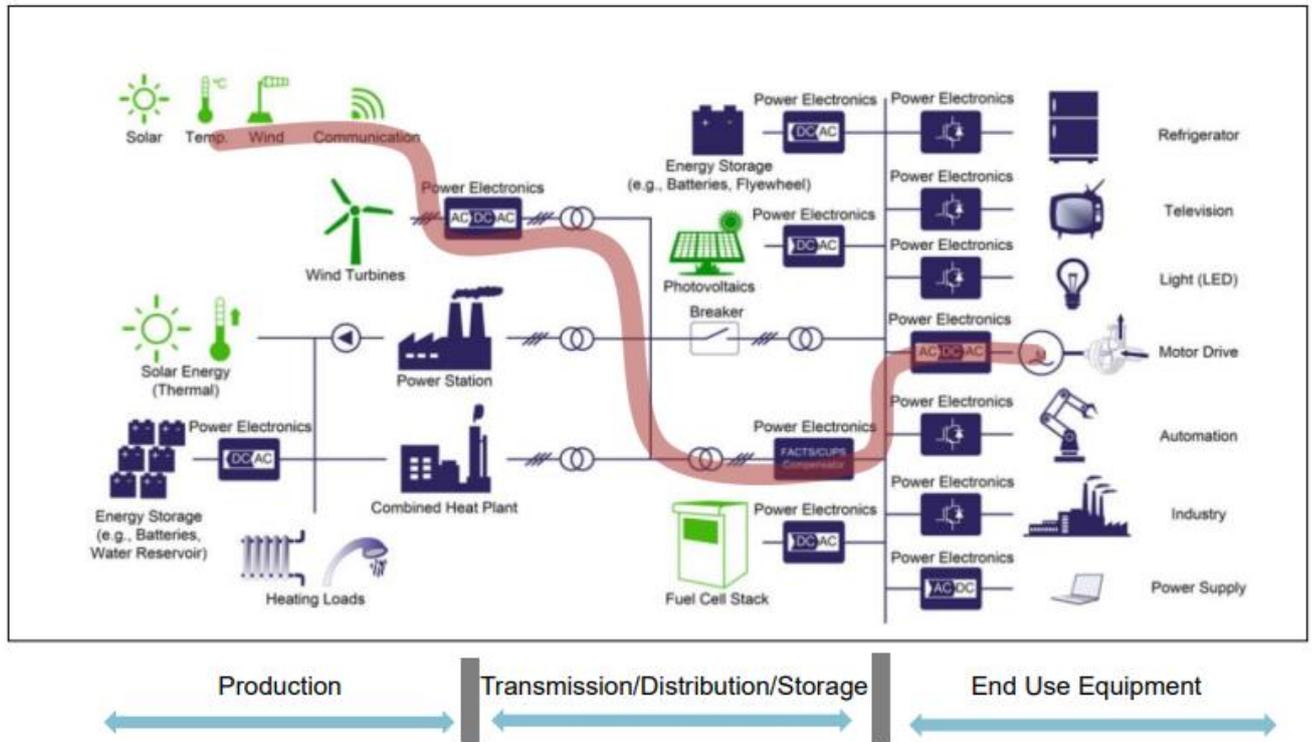
寬能隙(wide band gap, WBG)材料所製造的功率半導體元件(power semiconductor device)可降低能量耗損進而促進電力轉換效率，功率半導體元件幾乎無所不在，特別是在運輸電氣化、再生能源占比提升、工業智慧化等趨勢下，寬能隙功率半導體元件對節能減碳之貢獻受到很大的期待。本文透過國際對寬能隙半導體節能效果之評估，環視寬能隙功率半導體應用在各使用端之節能潛力，作為我國重點推動之借鏡。

壹、寬能隙功率半導體節能應用備受市場期待

國際能源署 (IEA) 下的 4E TCP (Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-Use Equipment) 是為推動終端設備能源效率提升而成立的跨國合作計畫，其中 2019 年啟動的 The Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA)¹ 曾針對寬能隙半導體為基礎的電力電子元件(Power Electronic Device) 評估節能潛力，並推展寬能隙半導體電力電子元件國際標準，以引導政策制定者及政府對寬能隙半導體電力電子元件之推動。圖 1 可看出電力電子元件

¹ The Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA) 由 4 個 IEA 會員國政府 (奧地利、丹麥、瑞典及瑞士) 資助成立，於 2019 年啟動，目前處於建置階段 (2020-2024 年)，針對寬能隙半導體為基礎的電力電子元件，蒐集和分析其在能源效率及節能之資訊，並推展寬能隙電力電子元件國際認可，如國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)。

從電力的生產(含儲存)、輸配到產品終端應用幾乎無所不在。



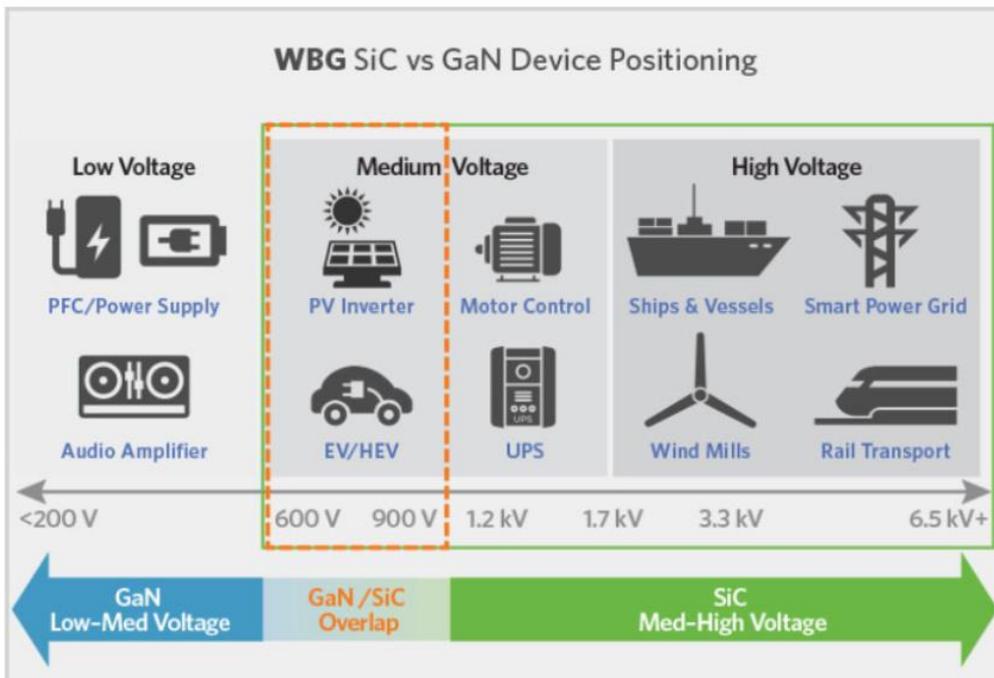
資料來源: Brüniger (2020) [2]

圖 1. 電力電子元件之應用

電力電子元件 (Power Electronic Device) 或稱功率半導體元件 (Power Semiconductor Device)[1]，其功用為電力設備的電能變換和電路控制，包含最基本的開關、變壓、變頻，以及變相、逆變、整流、增幅等。傳統發電及再生能源發電透過電網提供電力，或是儲能電池之電力提供終端設備使用，都可能需要經過前述各項轉換，也因此電力傳輸及利用過程中，皆存在著能量耗損(energy loss)。寬能隙材料中 III-V 族的氮化鎵(GaN)及 IV-IV 族的碳化矽(SiC)，是目前技術發展較為成熟且已顯現其商業價值的材料選項，所製造出來的功率半導體元件，可以提升更高的操作電壓，產生更大的功率，並降低能量耗損比例，此外相較矽元

件，其體積又可大幅縮小，因此也可帶來額外節能及減碳效果。

圖 2 為 SiC 和 GaN 預期可應用之領域，在目前的技術發展路徑下，SiC 和 GaN 特性仍有區別，僅在太陽能及電動車應用上有些許重疊，大部份應用仍處於互補之情況。高速火車之馬達、太陽能逆變器、電動車快速充電設施、電動車牽引逆變器及工業馬達等將可能採用 SiC；電動車車載充電器（On-Board Battery Charger, OBC）和 HV-LV 降壓轉換器（DC/DC conversion）、網路及伺服器、及消費性電子產品的低壓電源供應/快充等可能採用 GaN。



資料來源：Llew Vaughan-Edmunds (2019) [3]

圖 2. 以電壓區分 SiC 及 GaN 應用領域

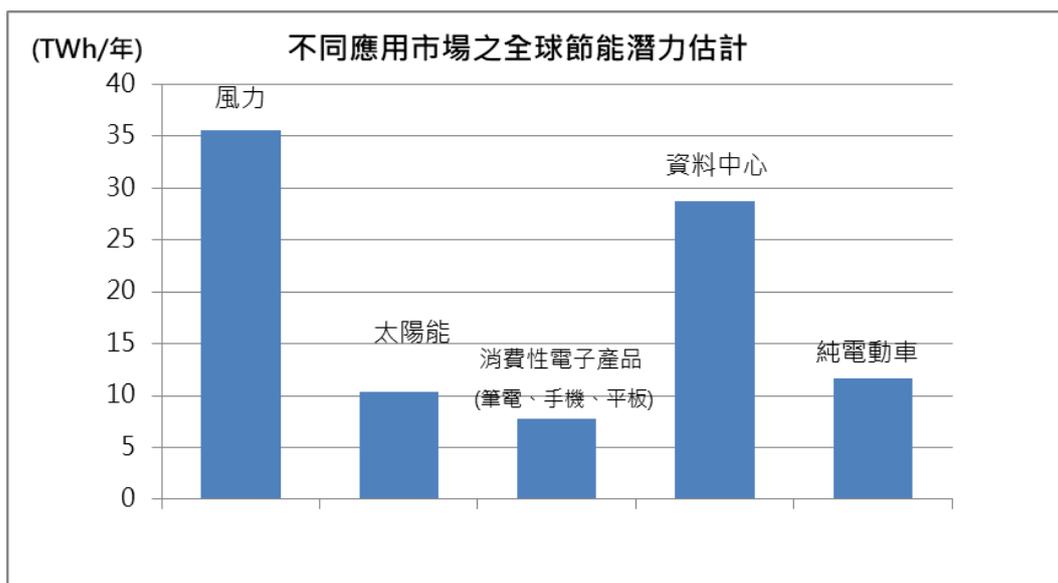
不過也因為功率半導體應用的範圍相當廣泛，且以多個元件形式存在於產品中，例如一台電動汽車用到的功率半導體便高達上百個，在缺乏各種產品耗能結構的資訊下，並不容易直接由單一元件的效率提升幅度得知整體產品能耗減少幅

度，甚至也不易推算對整體工業部門或運輸部門的節能效果。因此本文借鏡國際報告的分析結果，來了解寬能隙功率半導體在各產品應用上帶來的節能貢獻。

貳、國際研究單位對應用寬能隙半導體節能潛力之評估

美國能源局下的橡樹嶺國家實驗室 (Oak Ridge National Lab) 在 2017 年曾發布寬能隙功率半導體元件節能潛力評估之報告「Wide Bandgap Semiconductor Opportunities in Power Electronics」[4]，目的為協助美國能源部能源效率和再生能源辦公室 (DOE EERE) 辨視資源應投入哪些關鍵應用領域，唯受限於當時 GaN 發展成熟度較低的時空背景，此份報告多聚焦在 SiC 的應用。該研究發現 SiC 功率半導體元件相較矽 (Si) 功率半導體元件，能量耗損可降低一半，換言之，Si 元件之效率為 85-97%，SiC 元件之效率可提升至 95-99%。該研究以美國市場規模為例，估算在各領域應用的節能效益，以馬達驅動器應用的潛在總節能效果最大，再者為資料中心、再生能源 (太陽能 and 風電)，以及電動車。

而 IEA 下的 4E PECTA 於 2020 年出的報告「Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map」[5]，則羅列了更多 GaN 之應用場景 (如手機等消費性電子產品、照明)。圖 3 為寬能隙功率半導體於各應用領域帶來的全球節能潛力，由於全球的風力及太陽能在未來的成長幅度很大，因此其可能實現的節能潛力也隨之成長。而電動車方面，則假設未來年的新車(每年約 700 萬輛)皆為純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)，且此份報告沒有對工業用之馬達驅動器進行量化估計，故未在圖 3 中呈現。



資料來源: IEA 4E PECTA (2020) [5]

圖 3. 寬能隙功率半導體於各應用領域帶來的節能潛力

表 1 則依據上述國際報告，整理報告內所列示之寬能隙半導體的應用領域，以及相關的效率進步及節能評估數據。由於功率半導體可應用的場景相當多元，雖然透過文獻可了解其在不同產品上的效率提升幅度，但對各別使用者之節能效益，或是對整體產業/國家能帶來的節能效益，會涉及原本產品的效率、寬能隙半導體功率元件在市場上之滲透率(即有多少產品汰換為寬能隙為基礎之產品)等估算，因此除了效率提升比率外，仍需搭配本土化更詳細的各項設備當時之效率規格及電力消費統計資料才能作推算。以 PV 為例，採用 SiC 之逆變器，效率平均提升 2%，以 1MW 的 PV 裝置，容量因素(Capacity Factor, CF)約以 11.4% 估算，1MW PV 之年發電量為 1,000,000kWh，效率提升 2% 可增加 20,000 kWh 之電力產出，使用 20 年來看便多了 400,000 kWh，對各國的效益便需視該國 PV 之裝置量及採用 SiC 逆變器 PV 的比例而有所不同。

表 1. 寬能隙功率半導體於各領域電力電子元件之效率改善及節能評估

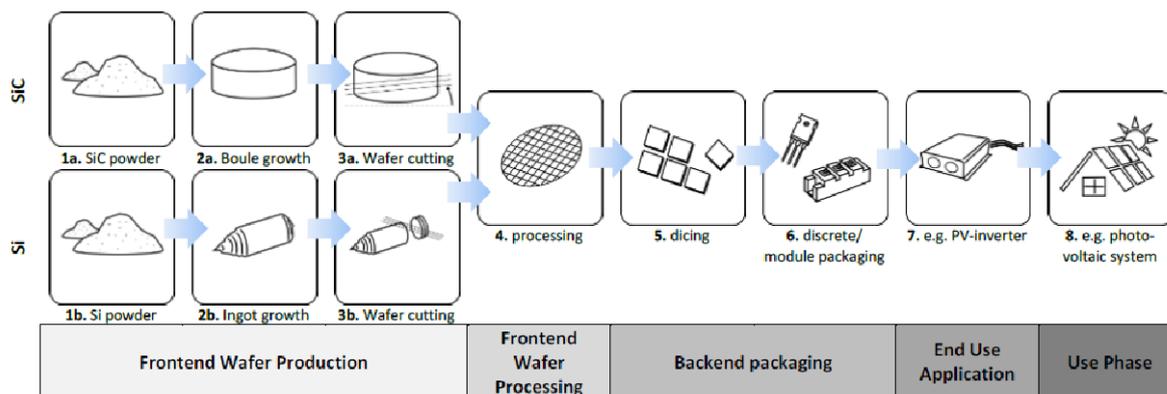
領域	說明	WBG 元件相較 Si 元件效率提升幅度	節能潛力 (受到滲透率影響)
電動車	牽引趨動(Traction driver)、動力控制單元(Power Control Unit, 將電池 DC 電流轉為馬達所需的 AC 電流、及 LV DC-DC 轉換、HV DC-DC 轉換或升壓器)、車載充電器 (on-board charger, OBC)、快充樁、無線充電	逆變器(inverter)之效率 Si 元件為 83%~95%，採用 SiC 元件普遍提升至 96% 以上;在每個轉換過程中，效率各別提升 8.5-9.5%，各類電動車能量損耗(loss)可減少 41~85% 以上，依行駛路段種類及里程有所不同(a)、(e) 採用 GaN 元件能量損耗減少 70% (c)	各類電動車能源使用(use)平均可減少約 10%、其中純電動車(BEV) 能源使用可減少 20% (a)、(e)
風力發電	頻率變換器(frequency converter) 控制葉片轉速使其和電網頻率匹配	電力轉換效率由 95% 提升至約 98%(a) 電力轉換效率由 95% 提升至約 98%(b)	發電量增加 3.4%(a) 發電量增加 3.1%(b)
太陽能	DC-AC 逆變器(inverter)、DC-DC 轉換器(converter)、升壓轉換器(boost converter)	逆變系統之效率由 96% 提升至 98~98.5% (a) 逆變系統之效率由 96.8% 提升至 98.8% (b)	發電量增加 2.6%(a) 發電量增加 2%(b)
分散式能源	點對點高壓直流輸電系統之電流控制(HVDC current /point to point)、電網高壓直流輸電系統之電壓控制(HVDC voltage /grid)、彈性交流輸電系統 (Flexible AC Transmission System)、智慧電網所用之固態變壓器	-	-
鐵路運輸	牽引趨動、電池(在無接觸線可用時作為牽引趨動及輔助電力系統)、輔助電力系統(輔助電力系統將電力能源經過適當的處理分配後輸送到車輛上各個用電設備)	電力損耗由 5-6% 降為 2-3% (相當於耗損減少 50% 以上) (a)	火車全數電動化後，能源使用減少約 7.8%，其中 6% 來自電力轉換，1.8% 來自重量減輕 (a)
照明	一般照明，路燈照明(搭配太陽能和電池的智慧型路燈、DC 路燈)	-	-
儲能電池	電池管理系統、混合儲能系統(搭配超級電容)、家用太陽能搭配之小型儲能、電網搭配之附加服務、水力儲能搭配之變速系統	-	-
冷暖器	變頻器	-	-
航空	電動飛機電池	-	-
船舶	電動船推進系統	-	-
工業馬達	馬達、變頻器(Variable Frequency Drive, VFD)	中壓變頻器效率由 95.8% 提升至 99%; 高壓變頻器效率 97% 提升至 99% (加權平均約 93.6% 提升至 98.6%) (a)	六成變頻器由 Si 改用寬能隙可減少電力使用 2.5% (a)
家用電器	洗衣機的滾筒趨動、洗碗機的幫浦、冰箱的壓縮機等	低壓變頻器效率 90% 提升至 98.3%(a)	
資料中心	不斷電系統(UPS)、伺服器電源供應器(server PSU)、冷卻負載、配電裝置(PDU)	UPS 和 PSU 電力損耗減少約 50%，電力系統效率由 75% 提升至 90% (a) AC 資料中心使用 WBG 相較 Si 之整體效率由 75% 提升至 91% (b)	可減少電力使用 17%(a) 可減少電力使用 17.6%(b)
消費性電子產品	手機、平板、筆電之電源供應器 (AC-DC)	效率提升 0.4%~0.8% (d)	能源使用節省 23% (b); 因為體積變小、重量變輕、溫度低、效率高而可節省 40% 能源使用(c)

註：(1) (a) Armstrong et al., (2017)以美國 2025 年作為預估基礎[4]; (b) IEA 4E PECTA (2020)以全球作為評估基礎[5]; (c) Navitas (2022)以自身積體電路之下游產品為評估基礎[6]; (d)英飛凌半導體(2021)[7]; (e)各類電動車包含 BEV(battery EV)、HEV(hybrid EV)及 PHEV(plug-in hybrid EV)等三種[4]。

表 1 所列橡樹嶺國家實驗室及 PETCA 報告內所提供之節能潛力數據，應解讀成樂觀之節能潛力數據，因為現今各種電器或馬達的效率應較 2017 年有所提升，因此再替換成寬能隙為基礎之產品，進步空間也應更為保守。不過應用市場的廣度也隨著技術進步也會有所改變，如橡樹嶺國家實驗室報告裡曾指出在風機大型化趨勢下，WBG 之應用市場有限，原因是當時 SiC 仍無法滿足高壓需求(2017 年左右的技術僅達 1.7kV，大型風機需要 3.3kV~6.5kV)，但三年後 PECTA 的報告裡卻指出 WBG 於風力發電應用帶來的貢獻很大，不難想像是因為 2020 年之後 SiC 已出現 3.3kV 以上的產品，可滿足大型風機之需求。

參、寬能隙半導體生命週期之能源使用

由前述可看出寬能隙功率半導體可能在很多應用領域都帶來節能減碳之效益，SiC 和 GaN 因特性不同而在市場上扮演互補之角色。需要進一步深究的是在生產寬能隙半導體過程中的能源使用，有沒有可能超過其帶來的節能效益。4E PECTA 2021 年對 SiC 半導體生產過程之能源使用量進行調查[8]，並和 Si 半導體比較，不過因為 IC 晶片(chip)的製程繁複、製程微縮(die shrink)、創新速度相當快，且通常有機敏性，製程各階段排放量的可取得資料並不多，大多是加總後的資料。該研究簡要將半導體製程分成下列幾個階段(如圖 4)，概略性地比較 SiC 和 Si 的能源使用狀況。



資料來源: Díaz Triana (2020) [8]

圖 4. Si 和 SiC 半導體製程示意圖

表 2. Si 和 SiC 半導體製程耗能比較

製程階段	Si 和 SiC 耗能比較
I. 晶圓生產前端作業	Si 和 SiC 的原料都是矽砂,但要形成 SiC 晶錠會比 Si 晶棒耗費 20~40 倍的能源;接著晶錠和晶棒都需要被切割成晶圓,此製程 SiC 困難度相較於 Si 高許多,因此能耗也較多,估計產生未拋光的晶圓, SiC 能耗是 Si 的 7 倍。
II. 晶圓加工之前端作業	功率半導體產品可大致分為功率離散元件(Power Discrete) 與功率積體電路(Power IC), 積體電路(IC)加工需上百個步驟, 離散元件加工需要的遮罩步驟遠低於 IC 加工, 不過 SiC 和 Si 的加工步驟大致相近, 但值得一提的是 Si 的良率多可達到 90%, 目前仍遠高於 SiC 的良率 75%。
III. 晶圓加工之後端封裝	SiC 和 Si 目前封裝標準差異不大, 因此能源使用基本上差不多。
IV. 終端應用	以目前應用較普遍的工業用變壓器或及電源供應器來看, SiC 的體積較 Si 減少 20%~50%, 重量也較輕, 因此減少所需之材料外, 運輸過程的能源使用也降低。
V. 整個生命週期之使用階段	如第二節所述, 最終使用的節能效果將因為應用標的不同及產品壽命年限有所差異。例如 1MW PV 使用 20 年的生命週期來看便多了 400,000 kWh。

資料來源: Díaz Triana (2020) [8]

PECTA 2021 年之報告尚未對 GaN 半導體之生命週期耗能進行分析, 不過從 GaN 重要廠商納維(Navitas)半導體揭露的永續報告書[5], 可大致了解生產 GaN 功率積體電路(Power IC)產品的能源使用需求。從原料來看, GaN 的組成即金屬鎵及氮, 其中氮在大氣中很容易獲得, 而金屬鎵是冶煉鋁時之副產品, 因此碳足跡不高。此外 GaN 功率積體電路可適用於舊有已成熟的互補金屬氧化物半導體 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)製程設備, 但產量卻是傳統矽

功率積體電路的 3 到 5 倍，且因為體積較小，產品的運輸過程碳足跡大幅減少，2020 年 GaN 功率積體電路製造及運送所產生的碳足跡僅約矽功率積體電路的 1/3 不到，每生產一單位的產品 CO₂ 排放約可略低於 0.2kg，而到了 2025 年，可降低至矽功率積體電路的 1/10 左右，每生產一單位的產品 CO₂ 排放約可略低於 0.1kg。這份報告揭示了由 Si 向 GaN 材料邁進時，生產過程的碳排放是下降的，在電力排碳係數變化不大情況下也隱含了能耗降低，不過因為半導體產業特殊的「無工廠模式(Fabless)」，使得排放取決於晶圓代工廠的電力使用碳排放，例如納維半導體的晶圓代工廠即是我國台積電，也因此晶圓代工廠使用的電力來源對寬能隙半導體功率元件/積體電路整體生命周期的碳排放有舉足輕重的影響。

肆、 結論

寬能隙功率半導體可能在很多應用領域都帶來節能減碳之效益，依據國際報告之盤查結果，以馬達驅動器應用、資料中心、再生能源（太陽能 and 風電），以及電動車為關鍵之應用領域，對節能有明顯貢獻。我國為實現 2050 年淨零排放目標對再生能源和電動車已有明確規畫，未來寬能隙功率半導體若應用於再生能源（含儲能）及電動車，對我國來說應可帶來不少節能減碳之貢獻。此外工業減碳不易，節電一直是重要項目，我國工業用電占全國電力消費 5 成以上，而馬達系統用電占工業部門用電約 7 成，因此也值得進一步盤查寬能隙功率半導體在我國工業應用之節電潛力。

參考文獻

1. 材料世界網 (2018) , 下世代功率元件市場趨勢
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=34319>
2. Brüniger R. (2020). Wide Band Gap Semiconductors-the future of power electronics.
3. Llew Vaughan-Edmunds (2019). Wide Band Gap-the Revolution in Power Semiconductors.(<https://www.appliedmaterials.com/nanochip/nanochip-fab-solutions/april-2019/wide-band-gap>)
4. Armstrong K., S. Das., L.Marlino. (2017). Wide Bandgap Semiconductor Opportunities in Power Electronics. Oak Ridge National Lab.
5. IEA 4E PECTA (2020). Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map.
6. Navitas (2022). Sustainability Report 2021.
7. 英飛凌半導體 (2021) . Determining the cost savings GaN offers power supplies.
<https://community.infineon.com/t5/Blogs/Determining-the-cost-savings-GaN-offers-power-supplies/ba-p/337860?redid=197141>
8. Díaz Triana, A., S. Schmidt, S. Glaser, M. Makoschitz (2022) A “life cycle thinking” approach to assess differences in the energy use of SiC vs. Si power semiconductors.