

碳化矽鈍化接觸薄膜技術應用於矽基太陽電池概述與發展現況

林郁斌 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 研究員

葉峻銘 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 資深研究員

蔡嘉鴻 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 副研究員

基於載子選擇性的概念模擬不同結構太陽電池進行理論效率計算，將鈍化接觸技術應用於太陽電池正面可再提高太陽電池效率，效率極限可達 28.2%~28.7%。然而在太陽電池正面鈍化接觸膜層若使用典型的摻雜多晶矽時，由於多晶矽與矽晶片本身的光學能隙相近，因此太陽光譜波段的吸收也相似，具有嚴重的吸收損耗，可使用透光度更好的寬能隙鈍化接觸材料碳化矽(SiC_x)以降低光吸收。Julich 研究中心和 Delft 理工大學採用碳化矽做為正面鈍化接觸層材料製作太陽電池轉換效率可達 24%，表示碳化矽做為電池正面的鈍化接觸層是非常有潛力的。本文將介紹碳化矽鈍化接觸薄膜技術應用於矽基太陽電池的發展現況。

一、前言

根據國際太陽光電技術路線圖(International Technology Roadmap for Photovoltaic, ITRPV) 2022 年版的預測[1]，顯示背面具鈍化效果之太陽電池(PERx/TOPCon)已成為矽晶太陽電池技術主流，市占率超過 8 成，並預期未來 10 年內，仍持續占據領導地位(如圖 1 (a)所示)。在 PERx/TOPCon 中，各類鈍化接觸(Passivated Contacts)技術預計在 2032 年將占超過 5 成，逐漸取代 PERC(如圖 1 (b)所示)，因此基於穿隧氧化層鈍化接觸技術所製備之太陽電池成了當前研究的熱點。

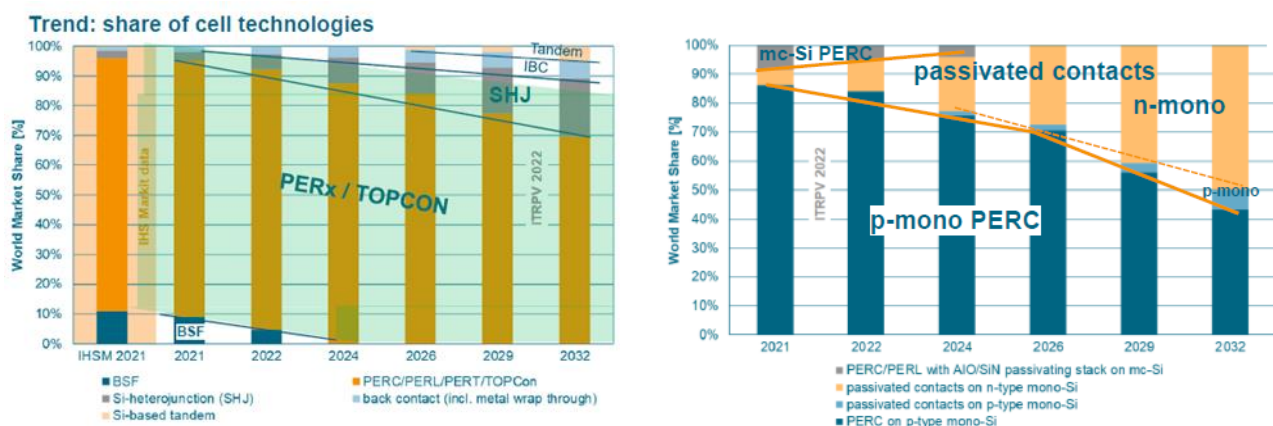


圖 1、(a)全球太陽電池技術市占率預測及(b) PERx/TOPCon 電池技術市占率預測[1]

台灣在 2020 年鈍化接觸技術應用於太陽電池的背面已經成功試量產，並於 2022 年導入量產。根據德國知名太陽光電研究機構 ISFH 基於載子選擇性的概念模擬不同結構太陽電池進行理論效率計算(如圖 2 所示)[2]，如將鈍化接觸技術也應用於太陽電池正面可再提高太陽電池效率，效率極限可達 28.2%~28.7%。較典型穿隧氧化層鈍化接觸 (Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon)電池效率高 1.1%~1.6%，且更接近矽晶太陽電池理論效率 29.43%。然而在太陽電池正面上使用摻雜多晶矽時，由於多晶矽與矽晶片本身的光學能隙相近，因此對於太陽光譜波段的吸收也相似 (如圖 3 (a)所示)，具有嚴重的吸收損耗。基於正面吸光問題，可使用寬能隙碳化矽材料，如圖 3 (b)所示[3]，對於 1.75 eV ~ 3 eV 之光子能量(波長 400 nm ~ 700 nm)的部分來說，碳化矽的吸收係數相較於多晶矽、非晶矽以及氧化矽是最低的，表示碳化矽具有更佳的透光性，能有效降低入射光被吸收的損耗。同時碳化矽又具有優異的表面鈍化特性，可大幅降低載子復合機率，非常適合應用於正面鈍化接觸層，提升整體光電轉換效率。

$\eta_{\max} [\%]$ $S_{e\&h}$		Electron-selective contacts			
		P-diffused n^+	a-Si:H(i) /a-Si:H(n)	th-SiO _x / poly-Si(n^+) PECVD	th-SiO _x / poly-Si(n^+) LPCVD
Hole-selective contacts	Al- p^+	24.5 (PERC) 11.7	26.8 12.8	26.9 12.8	27.1 12.9
	a-Si:H(i/p)	24.7 11.8	27.5 13.2	27.7 13.3	27.9 13.5
	SiO _x / poly-Si(p^+)	24.9 11.9	28.1 13.6	28.3 13.8	28.7 14.2
	SiO _x /Si:C (p^+)	24.9 11.9	28.0 13.5	28.2 13.7	28.5 14.0
	a-Si:H(i)/MoO _x	24.4 11.7	26.5 12.6	26.6 12.7	26.8 12.8
	MoO _x	24.1 11.6	25.9 12.3	26.0 12.4	26.1 12.4

圖 2、不同選擇性接觸太陽電池的理論效率[2]

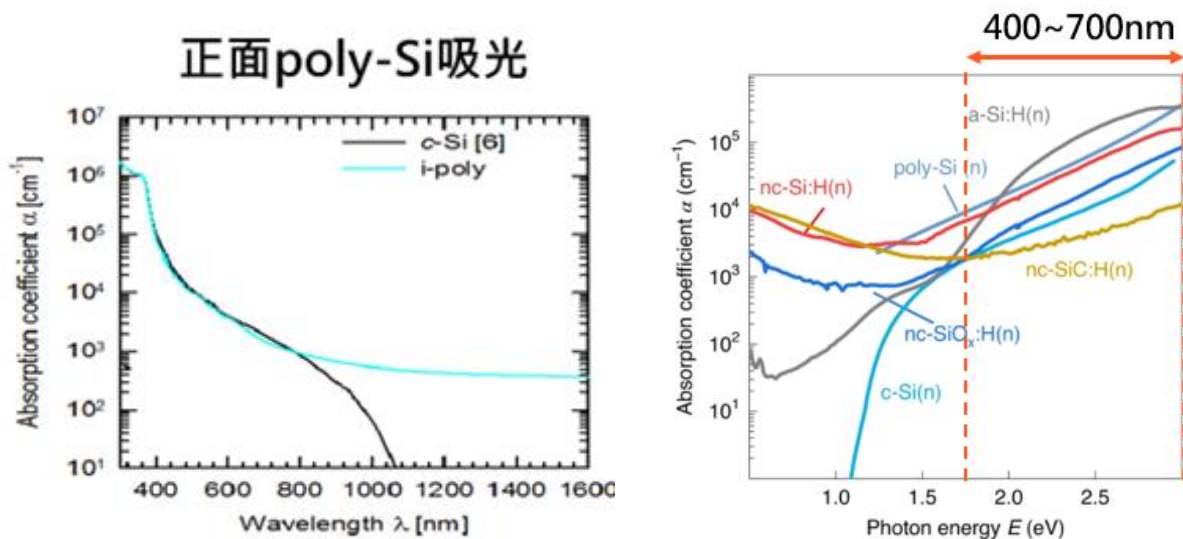


圖 3、(a) 多晶矽與矽晶光學波段吸收圖；(b) 不同材料光子能量與吸收係數關係圖[3]

二、鈍化接觸的原理

鈍化接觸是一種減少電極接觸相關的復合損耗的方法，由位於矽晶片和金屬電極之間的材料結構所組成，能有效地減少因矽晶片表面的缺陷造成的載子復合，同時由於功函數的差異，在矽的吸收表面處形成累積層而造成能帶彎曲。如圖 4 所示，累積層提供了少數載子到達鈍化層的障礙，然而多數載子可以容易地穿透鈍化層而以幾乎為零的損耗流出電池。由於復合損失較低，因此它們可用於全面積配置，可以避免使用單獨的鈍化層和局部金屬接觸。鈍化接觸具有簡化太陽電池製程的潛力，同時可提高電池轉換效率。

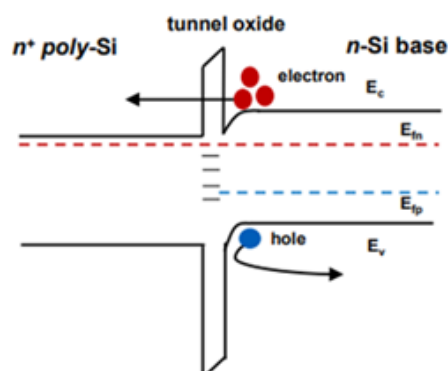


圖 4、穿隧氧化層能帶結構示意圖

(資料來源：Georgia Institute of Technology, 2016)

三、碳化矽鈍化接觸薄膜之材料光電特性與應用發展現況

正面鈍化接觸材料需要克服光學吸收損耗問題。碳化矽為寬能隙材料，可減少對可見光的吸收，適合做為高效率矽基太陽電池中的正面鈍化接觸材料。另一個優點是在高溫退火過程中比多晶矽更不容易產生因氫氣逸散造成的膜層起泡或分層，原因可能與碳氫鍵(C-H)

比矽氫鍵(Si-H)更穩定有關。

由文獻可得知[4]，碳化矽薄膜碳濃度變化對電阻率及寄生吸收損耗影響如圖 5 (a)與(b)所示，碳濃度越高則電阻率及寄生吸收損耗均會增加，其原因為如圖 6 所示之碳濃度越高造成的碳化矽結晶比例下降所導致。晶體結構不良會增加載子傳導的阻力，同時增加吸光的強度。因此如果碳化矽薄膜要做為太陽電池正面的鈍化材料，必須要能控制薄膜中的碳濃度。

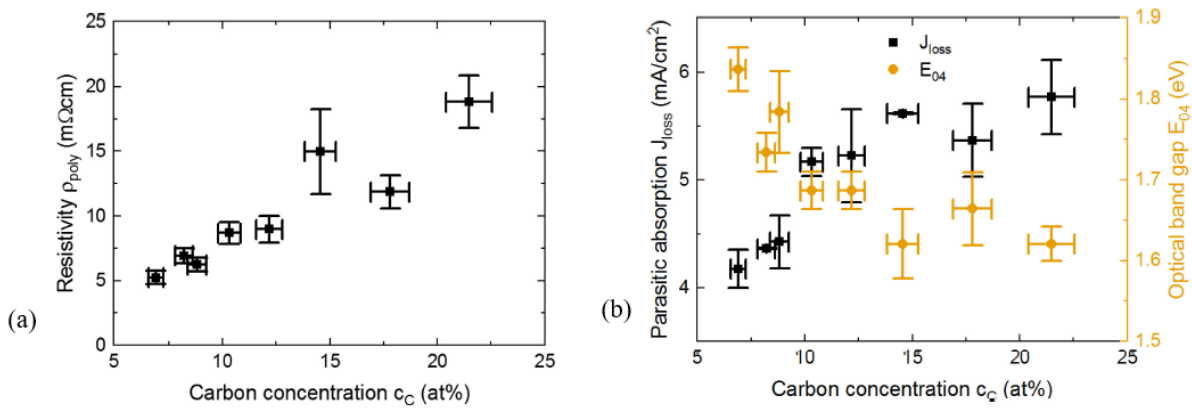


圖 5、碳化矽薄膜中碳濃度與(a)薄膜電阻率與 (b)寄生吸收損耗的關係圖[4]

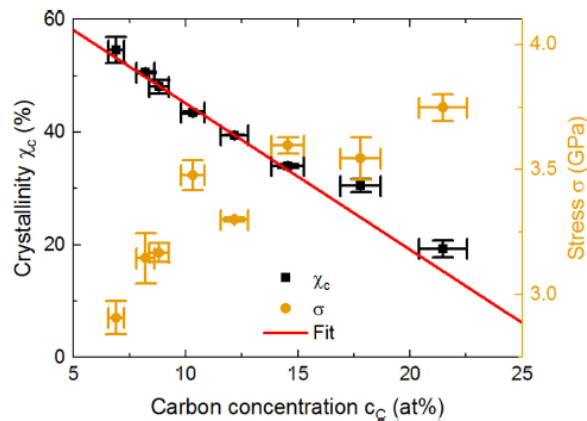


圖 6、碳化矽薄膜中碳濃度與結晶率關係圖[4]

然而碳化矽應用正面鈍化接觸太陽電池尚在起步，目前皆為實驗室開發的小面積元件。表 1 為目前國際上碳化矽鈍化接觸薄膜應用於正面鈍化接觸太陽電池之效率整理表。其中包括：Jülich 研究中心/Delft 理工大學(Forschungszentrum Jülich / Technische Universiteit Delft)、瑞士洛桑聯邦理工學院(École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL)與天津大學(Tianjin University)。

表 1、碳化矽鈍化接觸薄膜應用於正面鈍化接觸太陽電池之效率整理

鈍化層結構 (正面/c-Si/背面)	效率 (%)	面積 (cm ²)	製程方法	年份	研究單位
poly-SiC(n)/c-Si/ poly-Si(p)	20.17	4	PECVD	2020	Tianjin University
poly-SiC (n) /c-Si/ poly-SiC(p)	21.5	4	PECVD	2018	EPFL
	22.6	4		2018	
poly-SiC(n)/c-Si/a- Si(i)+a-Si(p)	21.6	4	HWCVD	2020	Jülich/TU Delft
	24	3.487		2021	

在天津大學方面，Xu 等人[5]在 2020 年使用 PECVD 技術通過調整 CH₄ 和 SiH₄ 之間氣體流量比例，發現碳化矽的光學能隙隨 CH₄ 流量增加而增大，但結晶率有所下降，不過這可以通過高溫退火得到改善結晶率。其太陽電池結構如圖 7 所示，初步驗證效率達 20.17%。比起對照組正面使用多晶矽的結構，可有效增加太陽電池的光電轉換電流。

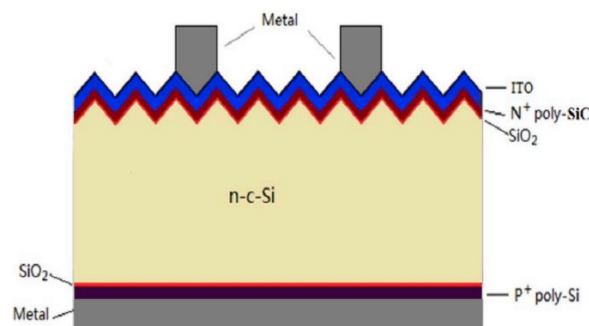


圖 7、天津大學將寬能隙碳化矽應用於正面鈍化接觸太陽電池結構圖[5]

在瑞士洛桑聯邦理工學院(EPFL)·Nogay 等人[6]使用了如圖 8 之正面與背面皆為碳化矽的元件結構，發現正面碳化矽的厚度大幅影響了光電轉換電流與效率。在厚度 15 nm 時有較高的 Voc，但光電轉換電流略低於 10 nm 厚度。反之在 10 nm 厚度時有較高的光電轉換電流，但 Voc 略低於 15nm 厚度，但兩者皆可達到轉換效率 22.6%。其展示成功利用共退火方式，可讓正面 n 型碳化矽及背面 p 型碳化矽同時形成多晶的手段，可達到良好的轉換效率。

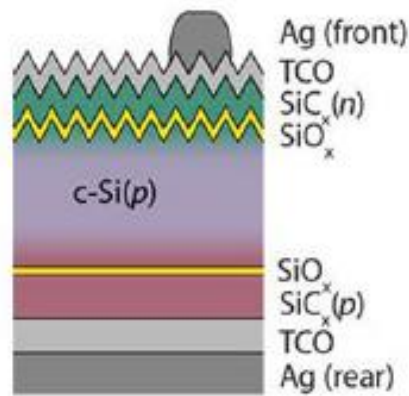


圖 9、EPFL 將寬能隙碳化矽應用於正面鈍化接觸太陽電池結構圖[6]

在 Julich 研究中心和 Delft 理工大學共同合作開發方面，Köhler 等人[3] 如圖 10 所示的元件結構，正面使用碳化矽做為鈍化接觸層，背面使用異質界面太陽電池(Silicon Heterojunction Solar Cells, SHJ)的非晶矽層當做鈍化接觸層。由於背面使用了該單位 SHJ 的技術，因此背面已有不錯的鈍化接觸效果。正面的碳化矽具有良好透光性，因此稱為透光型鈍化接觸(Transparent Passivating Contact, TPC)。碳化矽部分則使用熱燈絲化學氣相沉積系統(HWCVD)進行製備，研究發現不同燈絲溫度所生長的碳化矽薄膜具有不同特性。當燈絲溫度 $<1,860^{\circ}\text{C}$ ，薄膜具有較佳的表面鈍化效果，但與金屬接觸不佳；當燈絲溫度 $>1,900^{\circ}\text{C}$ ，則反之。作者利用高低燈絲溫度的組合，先將表面鈍化效果優異的碳化矽薄膜製作於穿隧氧化層之上，再將具有較低接觸電阻的碳化矽薄膜沉積於靠近電極處，以此雙層碳化矽結構來製作太陽電池的開路電壓(Open Circuit Voltage, V_{oc})為 725 mV，填充因子(Fill Factor, FF)為 80.9%，效率可達 24%。

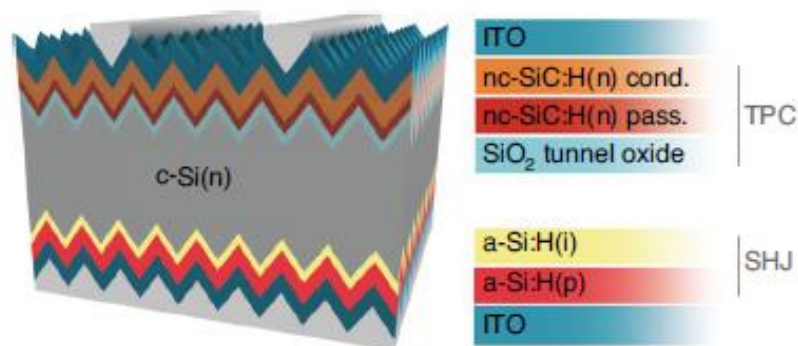


圖 10、Julich 研究中心及 Delft 理工大學共同合作開發將寬能隙碳化矽應用於正面鈍化接觸太陽電池結構圖[3]



由上述三篇文獻可發現碳化矽應用在正面之鈍化接觸太陽電池仍有許多難處需克服。關鍵在於必須同時考量到本身透光度、對矽晶表面的鈍化效果以及與金屬是否形成良好接觸，此三者分別影響了 J_{sc} (Short Circuit Current)、 V_{oc} 與 FF，如何平衡並達到最佳化是各個研究單位持續開發的重點方向。

四、結論

本篇文章主要介紹碳化矽鈍化接觸薄膜應用於矽基太陽電池概況與發展。鈍化接觸技術如也應用於太陽電池正面就可再提高太陽電池效率，效率極限可達 28.2%~28.7%，較原本 TOPCon 太陽電池效率高 1.1%~1.6%，且更接近矽晶太陽電池理論效率 29.43%。而正面採用多晶矽，因具有吸光問題，目前可使用透光度更好的寬能隙鈍化接觸材料碳化矽以降低吸收損耗，並藉由含碳量來調整能隙與電阻率，來獲得良好的正面鈍化接觸薄膜。目前由 Julich 研究中心和 Delft 理工大學採用碳化矽做為正面鈍化接觸層材料製作太陽電池的效率可達 24%，表示碳化矽做為電池正面鈍化接觸層是非常有潛力。技術關鍵在於必須同時考量到本身透光度、對矽晶表面的鈍化效果以及與金屬是否形成良好接觸，三者分別影響了 J_{sc} 、 V_{oc} 與 FF，如何平衡並最佳化是研究開發的重點。

五、參考資料

- [1] International Technology Roadmap of Photovoltaic, ITRPV (2022)
- [2] ISFH, Silicon PV 2019
- [3] Malte Köhler, Manuel Pomaska, Paul Procel, Rudi Santbergen, Alexandr Zamchiy, Bart Macco, Andreas Lambertz, Weiyuan Duan, Pengfei Cao, Benjamin Klingebiel, and Shenghao Li. A silicon carbide-based highly transparent passivating contact for crystalline silicon solar cells approaching efficiencies of 24%. *Nature Energy*, Vol.6, 529-537, (2021)
- [4] Jonathan Steffens, Swetlana Weit, Johannes Rinder, Raphael Glatthaar, Sören Möller, Giso Hahn, and Barbara Terheiden. Influence of the Carbon Concentration on (p)Poly-SiC_x Layer Properties With Focus on Parasitic Absorption in Front Side Poly-SiC_x/SiO_x Passivating Contacts of Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(6), 1624-1631. (2020)
- [5] Zhiyu Xu, Ke Tao, Shuai Jiang, Rui Jia, Wei Li, Ying Zhou, Zhi Jin, and Xinyu Liu. Application of polycrystalline silicon carbide thin films as the passivating contacts for silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 206, 110329 (2020)
- [6] Gizem Nogay et al., Crystalline silicon solar cells with coannealed electron- and hole-selective SiC_x passivating contacts. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(6), 1478-1485. (2018)