



TOPCon太陽電池之寄生吸收概述

Overview of Parasitic Absorption in TOPCon Solar Cells

宋人豪 J. H. Song¹、張瀚丞 H. C. Chang²、陳松裕 S. Y. Chen³

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹資深研究員、²副經理、³經理

摘要/Abstract

隨著穿隧氧化層鈍化接觸(TOPCon)太陽電池逐漸取代傳統的鈍化射極與背面電池(PERC)技術，成為新一代主流架構，TOPCon關鍵結構由穿隧氧化層(SiO_x)與摻雜多晶硅(N^+ Poly-Si)所構成，雖展現優異的載子選擇性與界面鈍化效果，卻也在波長300 nm~1,200 nm範圍內引發寄生吸收(Parasitic Absorption)，成為限制元件效率提升的一大挑戰。本文回顧寄生吸收成因，並彙整四項降低寄生吸收的設計策略，旨在實現電性與光學特性之最佳平衡，提升TOPCon太陽電池效率。

As TOPCon solar cells gradually replace the conventional PERC architecture, becoming the next-generation mainstream technology, their key contact structure—comprising a tunnel oxide layer and heavily doped polycrystalline silicon (SiO_x /Poly-Si)—offers excellent carrier selectivity and interface passivation. However, this structure also induces significant parasitic absorption in the wavelength range of 300-1,200 nm, posing a critical challenge to further improvements in device efficiency. This study reviews the underlying mechanisms of parasitic absorption in the SiO_x /Poly-Si contact and summarizes four mitigation strategies aimed at balancing electrical and optical performance, thereby enabling further enhancement of TOPCon cell efficiency.

關鍵字/Keywords

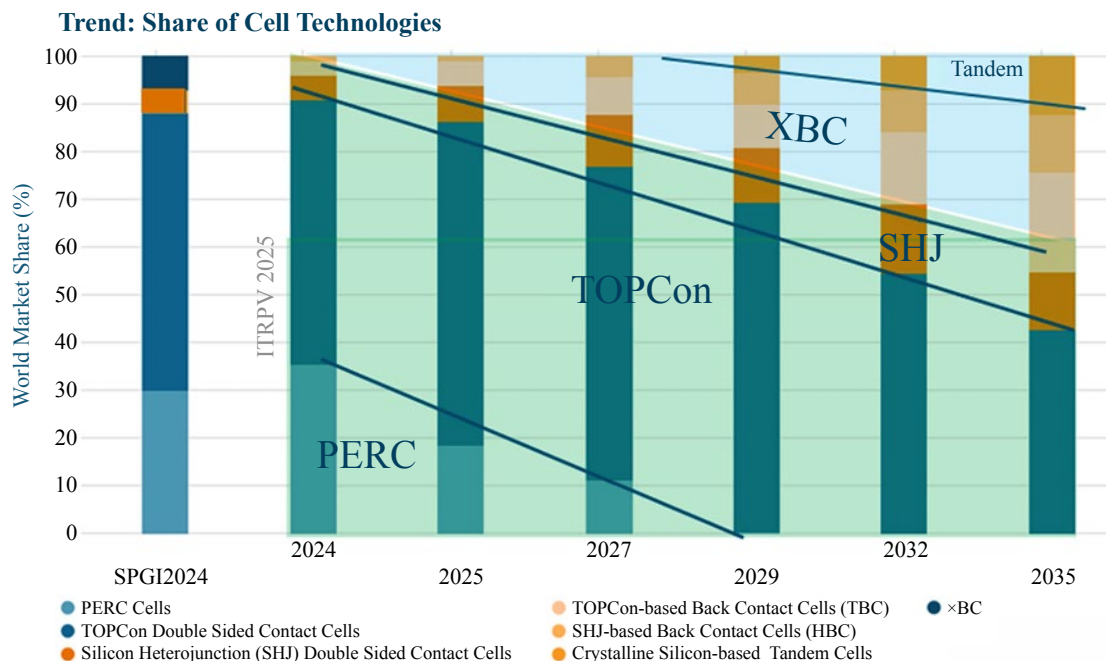
穿隧氧化層鈍化接觸(Tunnel Oxide Passivated Contact; TOPCon)、寄生吸收(Parasitic Absorption)、自由載子吸收(Free-carrier Absorption; FCA)



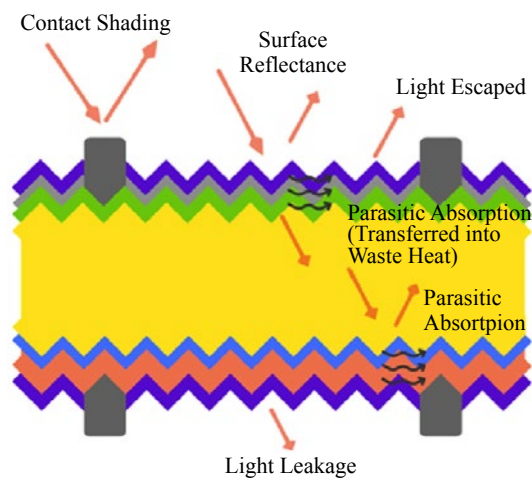
前言

穿隧氧化層鈍化接觸(Tunnel Oxide Passivated Contact; TOPCon)太陽電池結構在近十年於太陽光電領域中迅速崛起，已成為備受矚目的高效電池技術。其核心概念為在矽基表面沉積一層極薄的穿隧氧化矽層(SiO_x)，並結合重摻雜的多晶矽層(N^+ Poly-Si)，藉此實現優異的載子選擇性傳輸與界面鈍化效果。此一結構不僅能有效降低少數載子復合電流密度(J_0)，提升開路電壓(V_{oc})，亦具備與現有產線製程的高度相容性。根據國際太陽光電技術路線圖(ITRPV)分析(見圖一)⁽¹⁾，目前市場已由傳統的PERC逐步轉向TOPCon技術，其市占率已達68%，並成為主流技術。

全球包含台灣在內的光電製造業者，均已投入TOPCon的量產與優化，目前量產電池效率已突破25%，展現挑戰異質接面(SHJ)與背接觸(BC)等高階電池技術的潛力。然而，儘管TOPCon具備優異的電學性能，其重摻雜多晶矽層仍面臨寄生吸收(Parasitic Absorption)問題，影響300 nm~1,200 nm波長範圍極廣，導致光電流損失。在雙面TOPCon (Bifacial TOPCon)電池中，自由載子吸收(Free-carrier Absorption; FCA)效應更進一步降低了雙面發電效率。在TOPCon結構中，多晶矽層的主要功能是選擇性導通與界面鈍化，並非為光吸收或光電轉換。因此，如何有效抑制其寄生吸收，已成為當前TOPCon電池效率提升的重要研究方向。



▲圖一 單晶太陽電池技術的市場占比⁽¹⁾ (彩圖請見材料世界網)



▲圖二 太陽電池常見的各種光學損失型態⁽²⁾

寄生吸收損失

在太陽電池中，光學損失是限制光電轉換效率的主要因素之一，光學損失泛指入射光子無法被有效轉化為電子-電洞對的過程，而寄生吸收是其中一種機制。不同於反射或遮蔽等單純未入射者，寄生吸收指的是光子雖然已被電池內部材料吸收，卻未參與光生載子的產生，而是轉換為熱能，因此寄生吸收常與其他損失類型混淆。以下將說明幾種光學損失的機制與對應的改善策略，如圖二⁽²⁾所示。

1. 反射損失

反射是最基本的光學損失形式。當太陽光從空氣進入太陽電池的表面（如玻璃或抗反射膜）時，因折射率不連續而產生反射，造成光無法進入光轉換層進行光電轉換。未經處理的矽表面反射率可高達30%。為了降低此損失，產業上常使用抗反

射膜（如氮化矽 SiN_x 、氮氧化矽 SiON ）與表面紋理化（如金字塔絨面）設計，能將反射率降低至5%以下。

2. 遮蔽損失

太陽電池表面的電極會遮擋部分入射光，造成遮蔽損失。遮蔽損失與電極設計密切相關，需在導電性與遮蔽面積之間取得平衡。為降低遮蔽率，可採用細線寬、高密度柵線設計，或使用透明導電膜（Transparent Conductive Oxide; TCO）。另有技術如指叉背接觸（Interdigitated Back Contact; IBC），將所有電極接觸設於背面，可有效消除遮蔽效應。

3. 透射損失

光轉換層太薄或吸收係數不足時，部分長波長光（1,000 nm~1,200 nm）會直接穿透，或於背面結構反射後仍未被有效吸收，再次由正面穿出。現階段單晶矽片越做越薄，此情況尤其明顯。為提升吸收效率，除了正面原有的金字塔絨面，常於背面設置反射層（如Al、Ag，或介電堆疊），以提升光子二次吸收率。

4. 寄生吸收損失

寄生吸收是光進入太陽電池後，被如鈍化層、導電膜、背接觸層吸收，而非於光轉換層進行光電轉換，因此無法產生光電流而造成的損失機制。這些光能最終轉換為熱，無益於能量轉換，是高效率電池中需特別關注的損失來源。

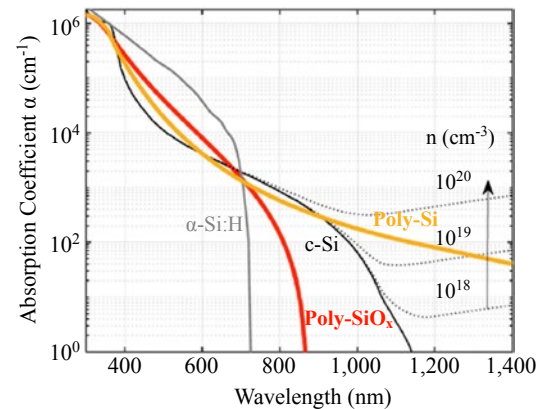


寄生吸收議題的起源與演變

在早期太陽電池的發展中，「寄生吸收」的概念並未受到廣泛關注，因為當時使用的單晶矽厚度達 $300\ \mu\text{m}$ ，幾乎可完全吸收AM1.5太陽光譜中的大部分波段，因此也沒有特別針對背面反射做材料結構設計。隨著表面鈍化（如 SiN_x ）與抗反膜技術推進，研究單位開始探討不同材料層的光學特性與損失，逐漸注意到射極(Emitter)層過厚、過度摻雜或表面鈍化層會發生短波長的吸收，這些現象後來即被納入「寄生吸收」範疇。在後續針對PERC與非摻雜薄層異質接面(HJT)電池的研究中，更發現如非晶矽(a-Si)、TCO、重摻雜多晶矽層等材料，皆可能針對特定波段造成能量損耗，進一步確認了寄生吸收為影響電池效率之關鍵瓶頸。進入TOPCon時代後，研究者開始以系統性角度重新檢視整體能量損失機制，並將分析焦點擴展至多晶矽層所引發的寄生吸收問題，推動此議題逐步被重視和深入探討。

多晶矽層的寄生吸收損失

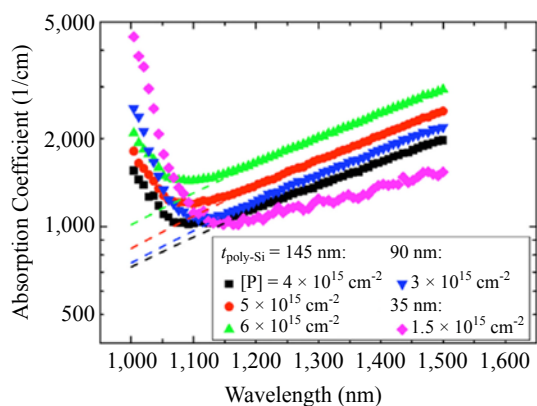
多晶矽層的寄生吸收損失主要來自兩個機制：本徵吸收(Intrinsic Absorption)與自由載子吸收(FCA)。TOPCon結構的多晶矽層主要功能是提供良好界面鈍化與選擇性載子收集，而非光吸收，因此，即使多晶矽層中發生本徵吸收產生電子-電洞對，特別是在短波長範圍，這些載子未必能跨過穿隧氧化層(SiO_x)進入矽基板，形成有效電流。FCA則是自由載子（如電子或電洞）在同一能帶內吸收光子，轉化為熱而非光電



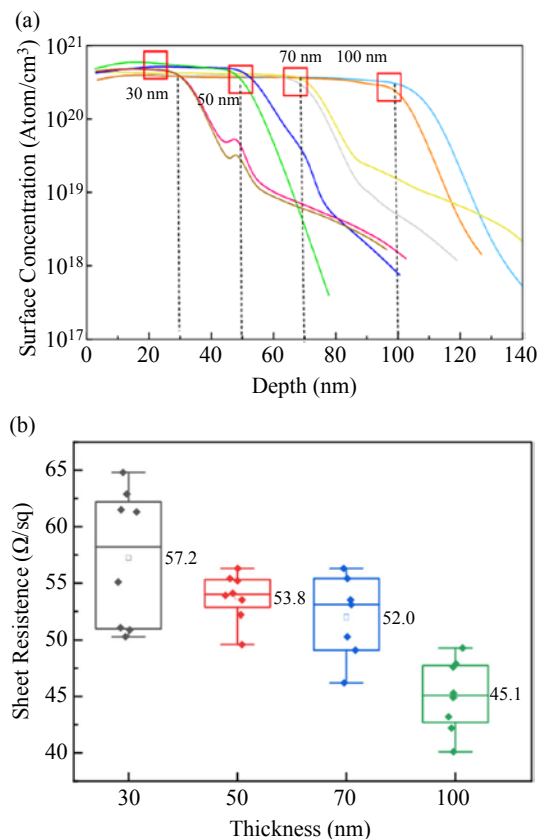
▲圖三 c-Si、a-Si:H和LPCVD沉積多晶矽的吸收係數⁽⁴⁾（彩圖請見材料世界網）

流；而在TOPCon之多晶矽層中，由於摻雜濃度極高（如磷摻雜濃度達 $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ ），自由載子數量充沛，根據Drude模型，FCA的吸收係數與波長平方成正比⁽³⁾，其損失集中在近紅外光，會造成短路電流(J_{sc})顯著下降，因此TOPCon電池的FCA是多晶矽層中的主要寄生吸收機制。

多晶矽層的寄生吸收與其結晶度、摻雜濃度、厚度以及製程條件密切相關。圖三⁽⁴⁾顯示包括結晶矽(c-Si)、含氫非晶矽(a-Si:H)和LPCVD沉積之吸收係數。矽的結晶度對吸收係數有顯著影響，通常LPCVD所製備的多晶矽結晶度可超過80%，因此在短波段的吸收行為與c-Si接近。可以由圖三得知， $300\ \text{nm}$ 至 $700\ \text{nm}$ 波長範圍內，多晶矽的吸收係數略高於c-Si，但低於a-Si:H。另一方面，多晶矽的摻雜濃度對長波長（ $800\ \text{nm}$ 以上）的吸收係數也有顯著影響，摻雜濃度越高，吸收係數越高。圖四顯示了不同磷離子注入劑量（ 1.5×10^{15} 至 $6 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-2}$ ）對多晶矽摻雜濃度與吸收係數



▲圖四 不同摻雜多晶矽層的自由載流子吸收係數⁽⁵⁾ (彩圖請見材料世界網)



▲圖五 (a)不同厚度多晶矽層的ECV曲線；(b)片電阻⁽⁹⁾ (彩圖請見材料世界網)

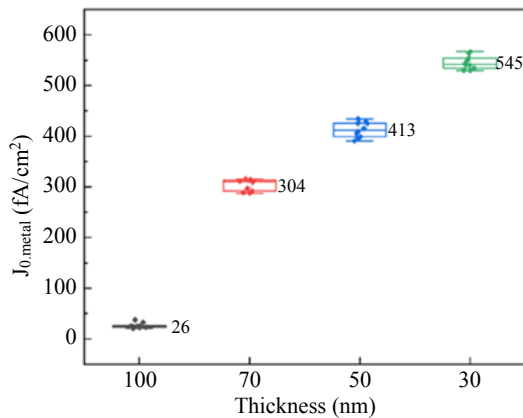
的關係⁽⁵⁾。結果顯示，多晶矽在1,000 nm波長以上的吸收係數會隨著摻雜濃度提升而增加，明確反映FCA效應的影響。這種FCA現象是由於在高摻雜濃度下，自由載流子濃度增加，導致更多的光被自由載流子吸收。這些光子原本能穿透矽基底，並經由背面結構（如SiN或金屬電極）反射後再次進入光轉換層被有效利用；然而，這些光子在回收之前就被多晶矽層過早吸收，無法產生有效的電子-電洞對，成為一種典型的「光子浪費」損失來源。

綜合而言，結晶度主要影響短波長(300 nm~800 nm)的吸收，而FCA則主導長波長(800 nm~1,200 nm)的吸收。當多晶矽層位於光入射面時，結晶度對整體吸收影響更為顯著；相反地，當位在太陽電池背面時，長波長的FCA影響則更為關鍵。

降低寄生吸收的關鍵技術

1. 多晶矽層厚度減薄

多晶矽層厚度減薄是最直接能減少寄生吸收損失的做法之一。模擬結果指出，放置於入光面之多晶矽層，厚度每增加10 nm，其 J_{sc} 會下降約0.5 mA/cm² ⁽⁶⁾。即使將多晶矽層放置於電池背面，當厚度達150 nm時， J_{sc} 仍可能損失約0.44 mA/cm²，影響不可忽視⁽⁷⁾。Chen等人⁽⁸⁾透過乾蝕刻技術（如RIE），將位於電池正面之多晶矽層厚度控制在100 nm左右，有效減少短波段吸收，使電池效率整體提高1.73%。然而，多晶矽層的厚度減薄雖能降低光學損耗，卻也會對多晶矽層的摻雜總量與導電性



▲圖六 不同厚度多晶矽層的 $J_{0,metal}$ 結果⁽⁹⁾

產生影響。如圖五所示，儘管表面摻雜濃度相同，當厚度減少時，總摻雜量也隨之減少，導致片電阻增加，若進一步減薄至100 nm以下，則可能嚴重影響鈍化品質與導電性⁽⁹⁾。

圖六顯示不同厚度多晶矽層的金屬接觸處的飽和電流密度($J_{0,metal}$)結果⁽⁹⁾。文獻表明，厚度為100 nm的多晶矽層具有最低的 $J_{0,metal}$ ，約26 fA/cm²。這可能歸因100 nm的多晶矽層有最低的片電阻值，有利於形成好的歐姆接觸；除此之外，較厚的多晶矽層亦能夠承受燒結過程中銀漿料對多晶矽層的燒蝕，維持良好的鈍化效果。總體而言，直接減薄多晶矽層雖可降低寄生吸收，但也會影響鈍化效果、片電阻、 J_0 、接觸電阻(ρ_c)和 $J_{0,metal}$ 。值得注意的是，近期研究導入之雷射增強接觸優化技術(Laser-enhanced Contact Optimization; LECO)，可在低溫燒結下，透過雷射局部熱處理改善金屬接觸品質，使得使用較薄的多晶矽層成為可能，進一步兼顧光學與電性表現。

因此多晶矽層的厚度最佳化可視為一種提升多晶矽太陽電池效率的關鍵技術。

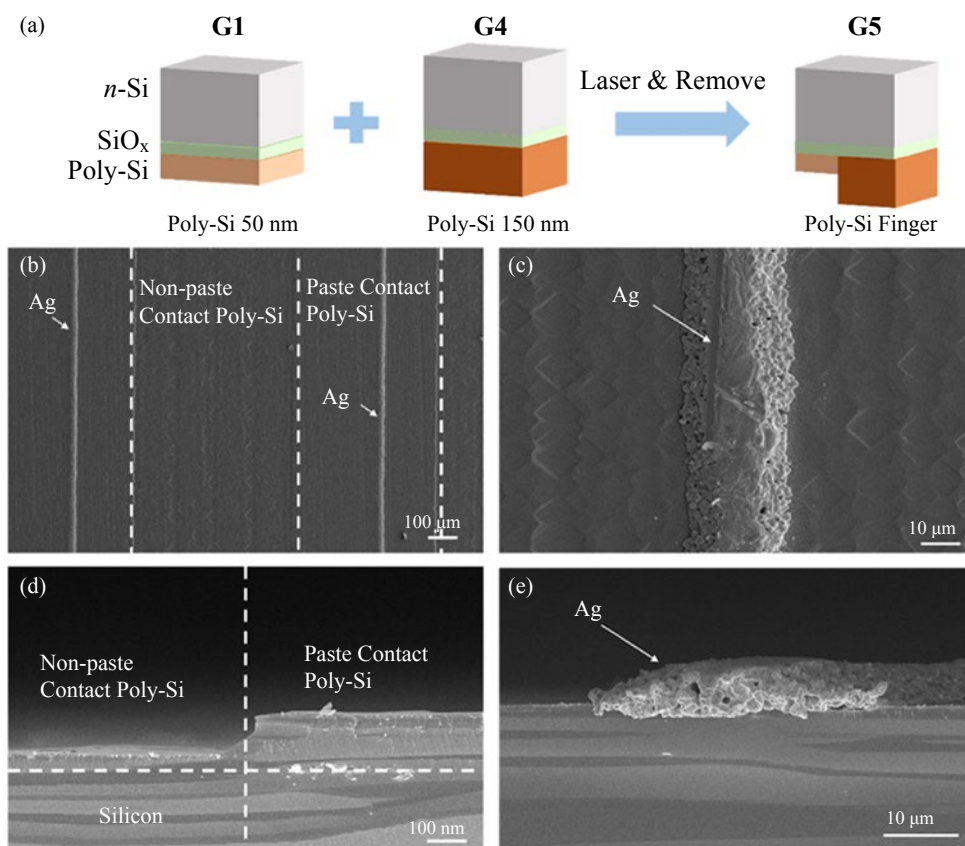
2. 多晶矽圖形化設計

隨著雷射技術的快速進展，Wangchao Wan等人近期針對TOPCon電池結構提出一種稱為指叉狀多晶矽(Poly Finger)或背面多晶矽圖形化技術的新型設計(如圖七)⁽¹⁰⁾。其核心概念為對多晶矽層的厚度進行區域性調控，在金屬接觸區域保留較厚的多晶矽層，以維持良好的歐姆接觸；而在非接觸區域，則利用雷射技術將多晶矽層局部減薄，以降低寄生吸收。此類圖形化結構設計，可有效在降低接觸電阻、提升載子收集效率與抑制寄生吸收之間取得良好平衡，為TOPCon電池性能優化提供一項具潛力的解決方案。

3. 導入透明導電膜緩衝層

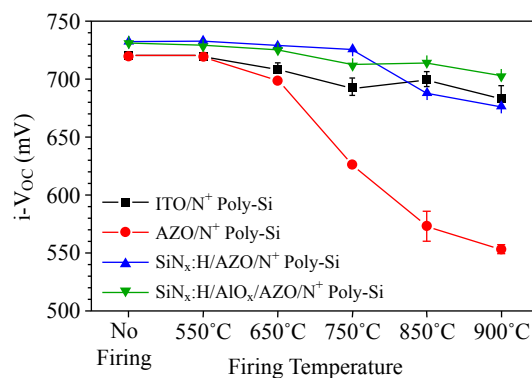
雖然多晶矽層厚度減薄有助於減少FCA，卻也可能導致導電性降低與鈍化效果劣化。為兼顧光學與電性需求，導入透明導電膜(TCO)作為多晶矽層上方的歐姆接觸緩衝層，已成為一項具潛力的技術方案。研究指出，透過結合厚度15 nm的多晶矽層與厚度15 nm的氧化銦錫(ITO)薄膜，並輔以SiN_x:H氫化處理，修復濺鍍所造成的表面缺陷，可實現極佳的光電性能表現，包括隱含開路電壓(iV_{oc})達732 mV、少數載流子壽命超過4.5 ms，以及極低的接觸電阻與 J_0 低於10 fA/cm²⁽¹¹⁾。

TCO的導入並不僅限於提升導電特性，它同時提供光學與能帶上的優勢。首先，

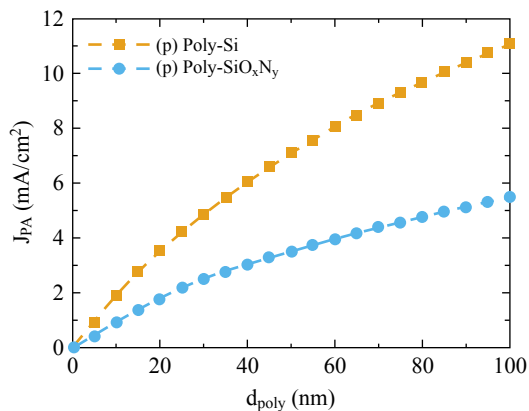


▲圖七 (a) Poly Finger (樣品G5) 的結構示意圖，此結構是透過雷射與去除技術(Laser & Remove)將G1與G4結合而成；(b~e) Poly Finger結構下，膠料接觸區與非膠料接觸區的多晶矽區域之SEM上視圖與截面圖⁽¹⁰⁾

TCO具備寬能隙(通常為3.2 eV~3.6 eV)，在300 nm~1,100 nm波段幾乎不吸收光子，能有效降低短波與長波段的寄生吸收。其次，TCO的功函數(一般為4.4 eV~4.7 eV)有利於與N型多晶矽或基底矽形成適當的能帶對齊，促進多數載子(電子)導通，並阻擋少數載子(電洞)反向注入，進一步降低復合損失。針對TCO的高溫穩定性疑慮，如圖八⁽¹²⁾所示，研究指出在高溫製程下，採用AZO/AlO_x/SiN_x:H結構者，即使經過高達650°C~900°C的退火處理，其*i*V_{oc}仍可維



▲圖八 在不同燒結溫度下，TCO應用於N⁺型多晶矽上的*i*V_{oc}變化⁽¹²⁾(彩圖請見材料世界網)



▲圖九 寄生吸收電流密度為P型Poly-Si或Poly-SiO_xN_y層厚度的函數⁽¹⁴⁾

持在710 mV~743 mV之間，顯示其具備優異的製程耐受能力。綜上所述，TCO薄膜作為TOPCon結構中多晶矽層上的歐姆接觸緩衝層，兼具降低光學損失、提升導電性、改善能帶對齊與具高溫穩定性等多重優勢。

4. 輕元素摻雜技術

為降低多晶矽層中的寄生吸收，也有研究者提出摻雜輕元素（如：氧、碳、氮），即透過在濺鍍或在化學氣相沉積過程中引入氣體（如：N₂O、CO₂、CH₄、NH₃）等進行摻雜，形成Poly-SiC_x、Poly-SiO_x與Poly-SiO_xN_y等。輕元素摻雜多晶矽過程中已改變多晶矽層的微結構與結晶性，因此可調整其光學與電性表現⁽¹³⁻¹⁵⁾。

Steffens等人的研究顯示⁽¹⁴⁾，在PECVD製程中調整N₂O/SiH₄流量比（即R_{N₂O}值），當R_{N₂O}值增加，寄生吸收電流密度(J_{PA})會下降，且光學能隙(E₀₄)增加。然而當R_{N₂O}超過20%，則因結晶性顯著下降而造成相反趨勢，顯示摻雜量需適當控制。圖九顯示，

多晶矽中引入氮、氧等輕元素可有效提高J_{PA}，且改善效果會隨層厚增加而提升，適當厚度調整有助於J_{PA}的優化，模擬顯示當厚度為40 nm時，電池效率可提升約2.5%。

另有研究也指出，Poly-SiC_x結構中碳濃度提高雖使結晶度下降，但仍可在7%~22%的濃度範圍內有效抑制J_{PA}增加，達到光學改善效果⁽¹⁴⁾。Lin等人研究以CH₄氣體摻碳的多晶矽層⁽¹³⁾，在880°C退火後可做到iV_{oc}達750 mV、少數載子壽命為15.3 ms、接觸電阻低於8 mΩ·cm²，顯示電性亦能維持優異水平。綜合而言，在多晶矽結構中引入輕元素是降低寄生吸收並提升電池性能的有效策略，未來透過優化摻雜與結構設計，將有助於實現更高效率的太陽電池。

結 論

TOPCon電池作為目前主流高效矽基太陽電池技術，其實驗室效率已達26%以上的水準⁽¹⁶⁾，逐步逼近Shockley-Queisser理論極限。在此高效率門檻下，降低細節性的損失（如寄生吸收）將成為突破的關鍵。寄生吸收雖不如復合損失顯著影響V_{oc}，卻直接影響J_{sc}且難以完全避免。因此，如何針對多晶矽層進行材料與結構優化，成為提升紅外光響應與整體光電轉換效率的核心課題。

文章中提到包括厚度減薄、圖形化設計、輕元素摻雜與TCO鍍膜等，皆可透過整合多晶矽材料與製程優化，有效進一步抑制寄生吸收，同時維持良好的鈍化與導電性能。例如，在非金屬接觸區域減薄多晶矽、導入Poly-SiO_xN_y結構，並於其上沉積TCO緩衝層，即可降低自由載子吸收，



同時促進選擇性接觸，進一步提升雙面率與 J_{sc} 表現。這不僅有助於優化TOPCon元件，亦為後續發展技術如鈣鈦礦/TOPCon堆疊太陽電池或背接觸太陽電池(TBC)奠定基礎。展望未來，隨著PECVD與雷射製程日益成熟，搭配氫化與新型材料導入，有望在製程簡化、效率提升與成本降低之間取得最佳平衡，推動TOPCon技術整合至下一個世代主流電池。☞

誌 謝

本研究工作承蒙114年度經濟部能源署「挑戰矽晶極限之矽基太陽電池技術開發計畫(1/3)」(契約編號：114-S0102)經費支持，特此致謝。

參考文獻

1. PVCellTech, Frankfurt/Main, March 11 2025.
2. S. Deng et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 267 (2024) 112704.
3. J. I. Pankove, Optical Processes in Semiconductors, Dover Publications 1971.
4. R. Santbergen et al., Optical Nanostructures and Advanced Materials for Photovoltaics, Optica Publishing Group, 2017.
5. M.A. Green et al., Solar Cell Efficiency Tables (Version 62), National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), 2023.
6. F. Feldmann et al., Energy Proc. 124 (2017).
7. C. Messmer et al., IEEE J. Photovoltaics 10 (2) (2020).
8. K. Chen et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 236 (2022) 111510.
9. Qinqin Wang et al., Materials 17, 2747, 2024.
10. W. Wan et al., Solar Energy Materials & Solar Cells 286 (2025) 113600.
11. F. Meyer et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 219 (2021) 110815.
12. E. Bruhat, et al., AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2019.
13. Y. Lin, et al., Energy Environ. Sci. 14 (12) (2021) 6406-6418.
14. J. Steffens, Dependencies between Poly-Si Composition and Solar Cell Performance of Poly-Si/SiO_x Passivating Contacts, 2020.
15. Z. Xu et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 206 (2020) 110329.
16. Trina Solar. (2024, November 21). Trina Solar claims record-breaking efficiency of 26.58% for TOPCon solar cell [Press release]. pv magazine.