



穿隧型異質接面矽晶太陽電池技術

葉峻銘博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 資深研究員

近年由於全球暖化以及環保意識的議題不斷高漲，加上非再生能源(如：石油、煤礦)等日漸耗竭，造就綠能產業隨之蓬勃發展，尤以太陽電池成為綠能產業主流之一，發展高效率低成本的太陽光電技術更是首要目標。以新式高效率太陽電池而言，穿隧型異質接面太陽電池為注目焦點，它的結構簡單為一鈍化接觸結構，除結合異質接面太陽電池之優點外，並具有傑出的表面鈍化能力以及載子選擇性，加上氧化矽層與多晶矽的搭配，提升於高溫製程環境之穩定性，對於未來關鍵製程技術開發將有相當大助益。本文將針對新式矽晶太陽電池-穿隧型異質接面太陽電池之技術及發展進行介紹。

一、前言

近十年來隨著全球整體經濟之蓬勃發展，使得非再生能源(如：石油、煤礦)在大量消耗下，除了能源危機也讓全球暖化環保問題層出不窮，促使再生能源技術發展備受關注。在各種再生能源之中，太陽能無疑是最大無碳能源的供給來源，太陽能源一整年約可以產生 1.76×10^5 兆瓦的能量，其中有600兆瓦的太陽能源照射到地球表面上可供人們使用，而太陽電池就是一種能將太陽光能源直接轉換為電能的光電轉換元件。當石油資源發生耗盡枯竭時，太陽能則是最直接能夠應用在一般日常生活所需的能源。由於再生能源的需求殷切，使得太陽電池市場迅速成長，太陽光電系統設置也漸趨成熟，且廣泛地於日常生活使用中。

由於太陽電池價格近年持續下跌之影響，使得全球太陽光電裝置量快速成長，現今太陽光電國際市場仍以矽晶太陽電池為主，其市佔率約達九成，如圖1所示，預估往後的十年也將持續維持九成左右之高比重市佔率。在市場需求之引領下，帶動各種太陽能新結構技術開發，透過尋找適合的新興材料以克服傳統材料對太陽電池效能的限制，然而這些技術是否具有量產可行性與價格競爭力，是衡量各種技術評價的主要指標，因此提高太陽能光電轉換效率，同時可有效的降低成本，是未來太陽光電發展方向的重點目標。

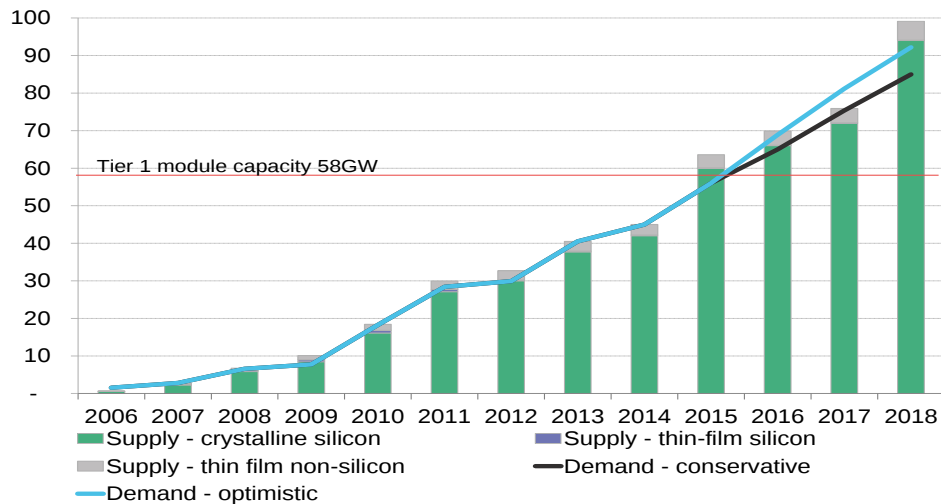


圖1、太陽電池市佔率預估

(資料來源：Bloomberg New Energy Finance, 2016)

目前太陽電池市場商品主要分為兩大類：P型矽晶太陽電池、N型矽晶太陽電池。

1. P型矽晶太陽電池：主要有標準背電場(Back surface field，簡稱BSF)結構太陽電池，以及近年來所發展的背面射極鈍化(Passivated emitter rear cell，簡稱PERC)結構太陽電池。標準背電場(BSF)結構為應用在單晶矽晶太陽電池，量產可達到19~20 %光電轉換效率；背面鈍化(PERC)結構太陽電池，目前光電轉換效率可達到21 %以上。
2. N型矽晶太陽電池而言，主要有異質接面太陽電池(Heterojunction with intrinsic thin layer，簡稱HJT)、以及交指式背接觸式太陽電池(Interdigitated back contact solar cells，簡稱IBC)，此兩種N型矽晶太陽電池皆可達到23 %以上的高光電轉換效率，如圖2所示，這是因為N型矽晶電池具有較低的複合電流，因此目前世界最高轉換效率之太陽電池皆是以N型為主。

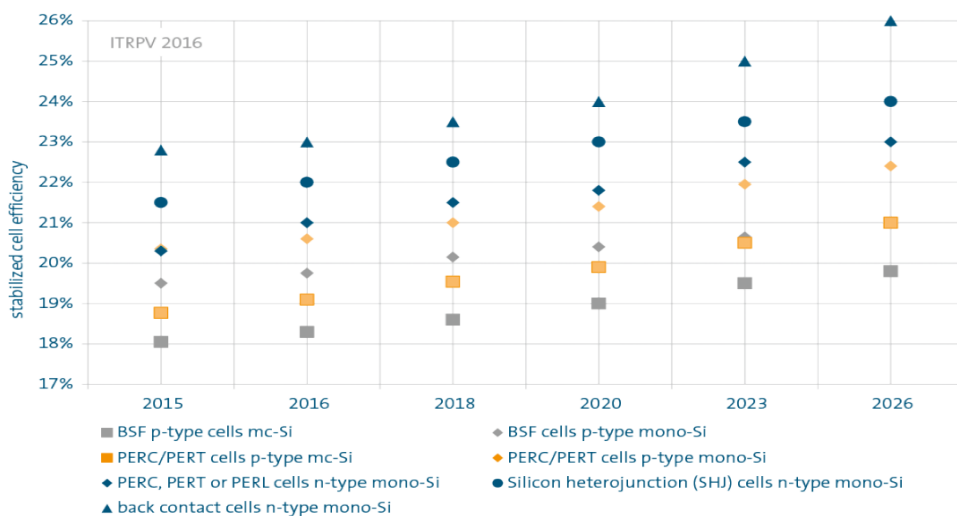


圖2、矽晶太陽電池效率發展趨勢

(資料來源：ITRPV, 2016)

二、穿隧型異質介面太陽電池技術發展介紹

太陽電池的運作原理，在吸收層吸收太陽光能之後會產生自由的電子電洞對，但自由的電子電洞彼此又會很快地復合，因此必須在自由的電子電洞復合之前，再利用內電場的方式分別收集至不同極性的電極。因此各個不同結構的太陽電池會有著不同電流傳導的方式，如圖3所示。

以BSF結構太陽電池、PRC(partial rear contact)結構太陽電池以及IBC結構太陽電池等三種類型電池而言，圖3的箭頭方向代表電流流動方向，電流傳輸方向可再細分：橫向傳輸、縱向傳輸。在傳統BSF太陽電池結構中，背面是使用鋁膠經過網印塗佈與高溫燒結後形成一背面電場層(BSF)，此一背面電場層形成一個背面全面積的接觸，由於背面全面積接觸的影響，其電流傳輸方向為單一縱向的傳輸。但在PRC結構太陽電池中，由於PRC結構電池背面是一背面鈍化層與點接觸的方式，其電流傳輸方向包含：縱向傳輸與橫向傳輸，且電流在橫向傳輸的距離將遠大於縱向傳輸，因此點接觸的點間距將是影響整體光電轉換效率很重要的一個因素。點接觸的金屬接觸點越多越密集，雖然串聯電阻會降低，填充因子會提高，但在開路電壓將會因此降低。這是因為金屬在與矽介面的地方，有非常大的電子能態密度，使得在金屬接觸的介面自由電子電洞的復合速度會非常大，造成矽晶片表面的鈍化效果會大幅的下降。

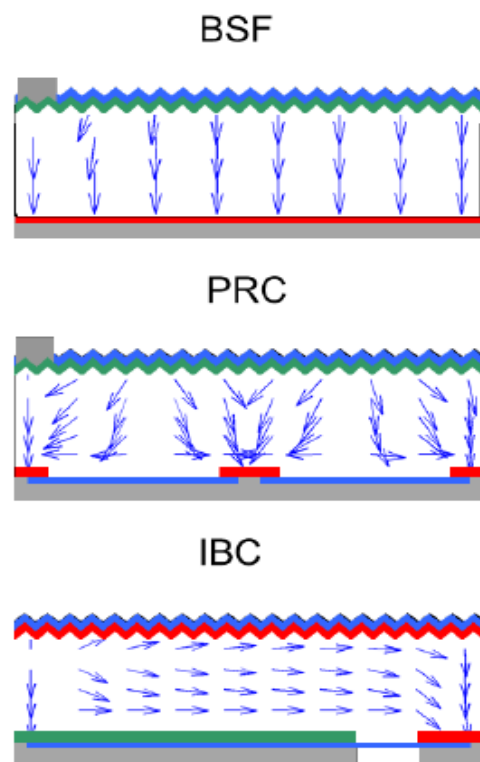


圖3、不同太陽電池結構的電流傳輸方式示意圖

(資料來源：31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition)

如何讓金屬接觸的接面上所造成的自由電子電洞的復合最小化，這對於太陽電池的技術提升為一個非常重要議題。下面有兩種方式可以有效的減少金屬接觸所造成的復合問題：(1)減少金屬接觸的面積，並且只在部分有形成金屬接觸的地方來製作摻雜，如：鈍化射極背面局部擴散太陽電池結構(passivated emitter with rear locally diffused，簡稱PERL)。(2)使用一個薄膜層的結構來隔開金屬與矽晶片的表面，且此一薄膜層對矽晶片表面必須要有很好的鈍化能力，另外這一薄膜層還可以作為太陽電池中一個具有良好導電性的接觸，我們稱此結構為一鈍化接觸的結構(passivated contacts)。我們所熟知的高效率太陽電池中的異質接面太陽電池就是一個很好的鈍化接觸結構的電池，目前世界最高轉換效率的異質接面電池為Kaneka團隊所製作的，光電轉換效率為26.33%，電池結構如圖4所示。

異質接面太陽電池是利用非晶矽薄膜(a-Si:H)作為一個鈍化接觸的薄膜層。非晶矽薄膜對矽晶片表面提供了非常好的鈍化效果，由於不同的能帶間隙材料的異質接合，異質接面矽晶太陽電池為單晶矽材料與寬能隙非晶矽薄膜材料的接合，能夠減少造成自由載子復合的界面能位密度(interface state density)，而達到很好的表面鈍化效果。再結合交指式背接觸式的結構，由於沒有了正面電極的光遮蔽，能夠有效的獲得在短路電流上的增益，而達到非常高的光電轉換效率。

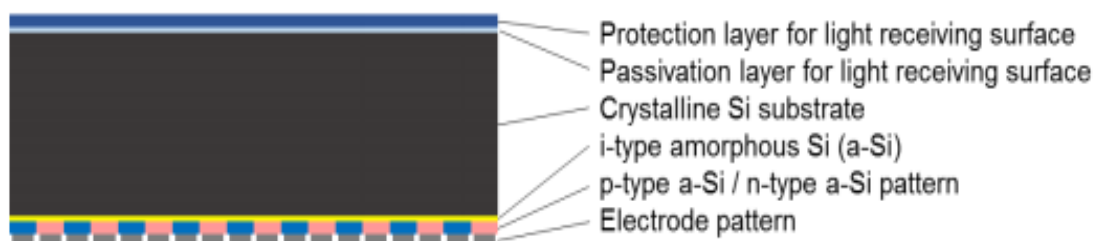


圖4、異質接面太陽電池結構示意圖

(資料來源：Kaneka corporation, 2016)

本篇文章所介紹的穿隧型異質接面太陽電池(tunneling heterojunction solar cell)就是一個鈍化接觸的結構，如圖5所示，這技術是使用一非常薄的穿隧氧化層與一重摻雜的多晶矽薄膜所堆疊結構作為鈍化接觸。穿隧型異質接面技術結合了非晶矽異質接面其高能隙的優點，擁有傑出的載子選擇性，但由於非晶矽薄膜在製程上有溫度的侷限性，在高溫下的環境下薄膜品質會劣化，因此穿隧型異質接面太陽電池在鈍化接觸上選擇了傳統的多晶矽薄膜作搭配，多晶矽薄膜相較於非晶矽薄膜對於高溫環境下有著更良好的穩定性，並且在電性上比非晶矽薄膜與透明導電氧化層(TCO)薄膜的堆疊具有更低的接觸阻抗。因此在n型太陽電池中，全面積的鈍化接觸的技術對於穿隧型異質接面太陽電池具有很大的發展潛力。

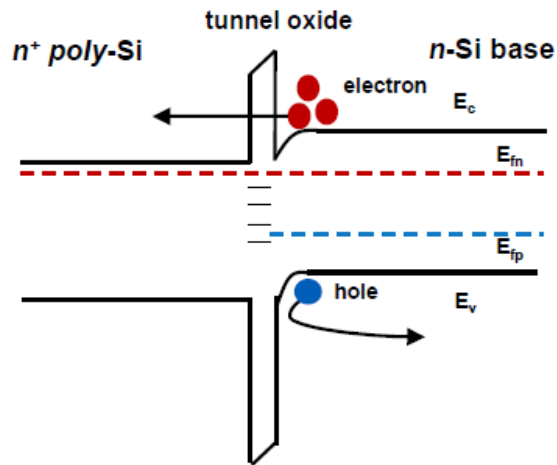


圖5、穿隧型異質界面能帶結構示意圖

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

在穿隧型異質界面太陽電池技術方面，近幾年來有不少國際研究單位紛紛投入研究開發，像是德國的Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)、Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH)、以及美國的再生能源實驗室National Renewable Energy Laboratory (NREL)等等。Fraunhofer ISE研發單位近年來致力於穿隧型異質界面電池技術研究，其發展的電池結構如圖6所示。矽基板是使用阻值 $1\ \Omega\text{cm}$ 的FZ n-type的晶片，在電池結構正面金字塔的部分是用硼擴散(boron-diffused)的方式製作射極，其阻值約為 $140\ \Omega/\text{sq}$ ，之後在射極上沉積氧化鋁薄膜(Al_2O_3)作表面鈍化層以及氮化矽作為抗反射層。在電池結構背面的部分就是使用穿隧型異質界面的結構，使用氧化矽薄膜與摻雜矽薄膜的堆疊作鈍化接觸，他們稱這樣的結構為TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)。Fraunhofer ISE發展TOPCon結構的太陽電池光電轉換效率達25.1%，開路電壓為718 mV。

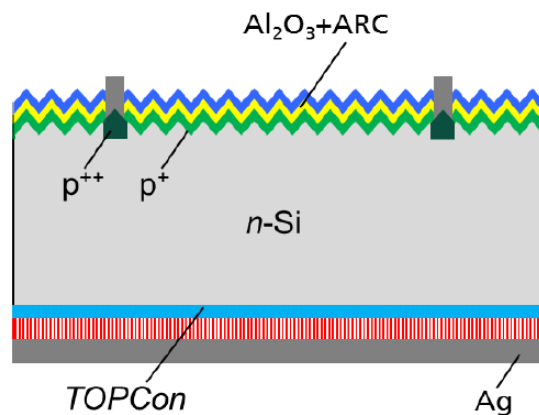


圖6、Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)結構示意圖

(資料來源：31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2015)

另一個研究單位ISFH在穿隧型異質接面太陽電池的研發上也有所投入，圖7為其發展的電池結構。這是一個雙面發電的太陽電池結構(bifacial solar cell)，電池的正面與背面部分在矽晶片表面皆是使用氧化矽層與摻雜多晶矽薄膜層堆疊作為鈍化接觸，多晶矽薄膜層是使用低壓化學沉積系統(LP-CVD)沉積P型與N型的矽薄膜，之後再將沉積完的矽薄膜進行高溫退火(annealing)，在高溫的環境下形成一PN接面，退火溫度約800-1050度。接著在多晶矽薄膜上沉積透明導電氧化層(TCO)作為抗反射層與載子傳輸層，他們稱這樣的雙面對稱結構為poly-Si on passivating interfacial oxides (POLO)。從ISFH的研究結果顯示，這種POLO junction結構的鈍化效果非常傑出， iV_{oc} (implied V_{oc})為732 mV，整體的 J_0 值為12 fA/cm²。

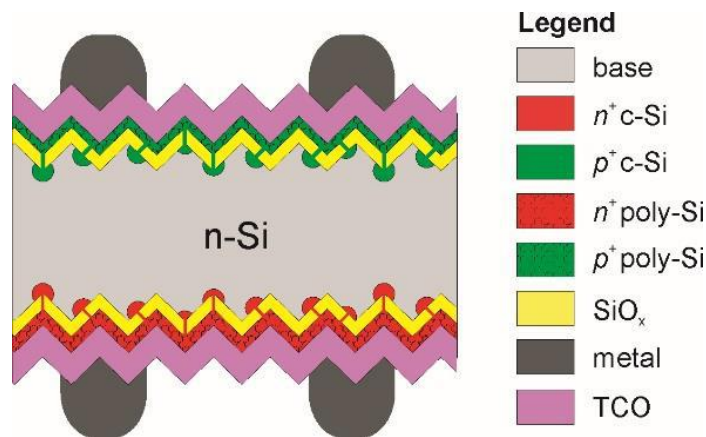


圖7、poly-Si on passivating interfacial oxides (POLO)太陽電池結構示意圖
(資料來源：32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,2016)

穿隧型異質接面太陽電池最主要的技術核心，在於對氧化矽層與多晶矽薄膜層的掌握，從各研究單位的研究顯示氧化矽層的厚度掌握非常重要，若氧化矽層厚度太薄，則會使得表面鈍化的效果降低；但若氧化層厚度過厚，則會阻擋載子的傳輸。因此如何製作並控制適當厚度的氧化矽層(1~2 nm)是非常關鍵的。在半導體製程技術中，矽晶片表面製作氧化矽層有幾種不同的方式，主要可分作兩大類：濕式氧化、乾式氧化。

1. 濕式氧化技術：成長氧化矽層的方式有下列幾種：(a)使用高壓高溫的水蒸氣氧化矽晶片表面、(b)將矽晶片浸泡在硝酸溶液中氧化矽晶片表面、(c)將矽晶片浸泡在含有臭氧的去離子水中氧化矽晶片表面。然而，濕式氧化因採用水蒸氣氧化矽晶片表面，氧化速度雖然快，但薄膜品質較差。而用浸泡硝酸溶液來氧化矽晶片表面，此技術氧化速度慢但薄膜品質好，缺點是需要使用到大量的硝酸溶液。
2. 乾式氧化技術方：使用高溫氧化爐管進行熱氧化(Thermal oxidation)的方式製作。在高溫氧化爐管中利用高純度的氧氣，在高溫的製程環境下將矽晶片表面反應成

二氧化矽(SiO_2)。而以高溫氧化爐管進行熱氧化所成長的氧化矽層薄膜品質較佳，且製程產出較大，是有利於量產的製程方式。

在不同製程方法成長的氧化矽層以及分別在平面與金字塔的矽晶片上對於表面鈍化的影響，如表1所示。當氧化矽層的厚度均控制在1.7 nm，從三個不同製程方法的氧化矽層中，包括：硝酸氧化、臭氧氧化、以及熱氧化，其中以熱氧化方式其表面鈍化的效果最好。另外，在不同的晶片表面形貌以及多晶矽的摻雜型態對表面鈍化也有不同的影響，以N型多晶矽在平面的矽晶片上表面鈍化為最佳，而P型多晶矽在金字塔表面的矽晶片上的表面鈍化為最差。

表1、多晶矽薄膜在不同製程方法成長的氧化矽層以及在平面與金字塔的矽晶片的表面鈍化之影響

Surface	Poly-Si doping type	H treatment	Chemical oxide (~1.7 nm)		Ozone oxide		Thermal oxide (~1.7 nm)	
			J_0 [fA/cm ²]	iV_{oc} @ 1 sun [mV]	J_0 [fA/cm ²]	iV_{oc} @ 1 sun [mV]	J_0 [fA/cm ²]	iV_{oc} @ 1 sun [mV]
planar	n^+	FGA	1.5	742	0.5	743	1.1	742
		SiN_x	0.6	747	0.6	748	0.8	749
textured	n^+	FGA	29	693	13	715	11	727
		SiN_x	6	735	4.4	738	3.8	741
planar	p^+	FGA	8	718	11	712	6	721
		SiN_x	5	729	5	727	3.8	734
textured	p^+	FGA	71	669	112	661	54	681
		SiN_x	40	690	48	684	27	700

(資料來源：32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016)

工研院綠能所的矽晶實驗室技術團隊對於穿隧型異質接面太陽電池技術也投入研發之列，致力於氧化矽的開發與均勻性的控制，摻雜型多晶矽結合氧化矽進行表面鈍化的技術發展，以及穿隧型異質接面太陽電池技術整合。摻雜型多晶矽結合氧化矽進行表面鈍化技術，結構如圖8所示，在拋光的矽晶片表面成長氧化矽與多晶矽薄膜，氧化物的厚度透過穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy：TEM)分析中觀察。圖8中顯示氧化矽的厚度控制在約1~2nm，這樣的厚度有利於載子的穿隧。另外摻雜型多晶矽結合氧化矽層表面鈍化能力上面，少數載子生命週期(lifetime)大於1.5 ms，顯示摻雜型多晶矽結合氧化矽層有很好的表面鈍化能力，少數載子生命週期的量測是使用Sinton Instruments WCT-120。最後在元件整合技術上其製程流程如圖9所示，摻雜型多晶矽與氧化矽層作為鈍化接觸，並結合抗反射層與金屬電極完成穿隧型異質接面太陽電池，電池光電轉換效率為23%。

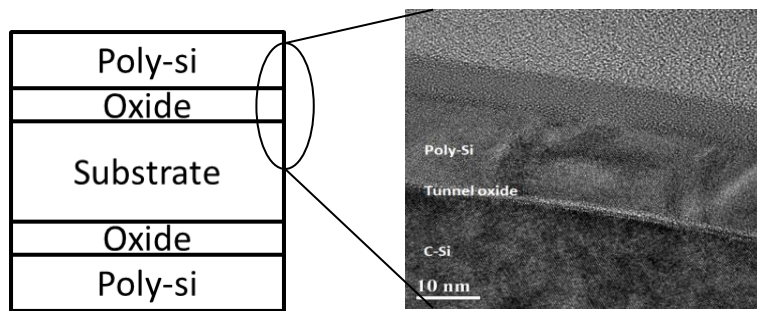


圖8、摻雜型多晶矽薄膜結合氧化矽層結構
(資料來源：ITRI, 2017)



圖9、穿隧型異質接面太陽電池製作流程圖
(資料來源：ITRI, 2017)

三、結論

目前全球太陽光電市場仍以矽晶太陽電池為主流，對於矽晶太陽電池相關之設備與製程技術也相對成熟，預估未來15年內仍會持續穩坐市場產品首位。對於穿隧型異質接面太陽電池，不但是新式高效率太陽電池的焦點，同時它的結構簡單且結合了異質接面太陽電池的優點，擁有傑出的表面鈍化能力以及載子選擇性，與多晶矽薄膜的結合，於高溫製程環境下仍具有穩定性，並且穿隧型異質接面太陽電池屬一鈍化接觸的結構，將可大幅減少金屬與矽表面接觸所形成的載子復合現象，目前已有相關的業者紛紛投入該技術研發，期待不久將來可預見此技術成為太陽光電產業的新焦點。