背接觸矽晶太陽能電池之概述與展望

An Overview and Perspectives of Back-contacted Silicon Solar Cells

彭胤瑋 Y. W. Peng[1]、張瀚丞 H. C. Chang[2]
國立清華大學(NTHU) 材料科學工程學系 [1]博士
工研院綠能所(GEL/ITRI) [2]研究員

自背接觸電池的概念被提出以來，由於其結構特性帶來的許多優點，而成為太陽能領域的熱門研究項目。在本篇文章中，我們將回顧並比較三種常見的背接觸矽晶太陽能電池的基本操作原理與關鍵特性，分別有交趾式背接觸太陽能電池、射極貫穿背接觸太陽能電池以及金屬貫穿背接觸太陽能電池。文章的後半部分則著墨於討論高效率低成本之網印型背接觸太陽能電池的實踐方法與其未來展望。

Ever since the first publication of back-contacted silicon solar cells, research into this kind of solar cells as an alternative to conventional front & rear contact solar cells has become a popular research topic due to the excellent architecture properties of the back-contacted solar cells. Back-contacted solar cells can be generally divided into three classes: interdigitated back contact (IBC), emitter wrap-through (EWT), and metallization wrap-through (MWT). Here we shall review their basic operation principles and critical features. In the second half of this article, we shall focus on the key technology for the high-efficiency low-cost screen-printed silicon solar cells and their perspectives.

關鍵詞/Key Words
背接觸太陽能電池(Back-contacted Solar Cells; BC)、網版印刷(Screen Printing)、交趾式背接觸太陽能電池(Interdigitated Back Contact Solar Cells; IBC)

前　言

用以製作太陽能電池的矽晶圓有n型與p型兩種，而現行主流的太陽能電池產品大多以p型電池為主。p型電池能成為矽晶電池的主要產品係來自於它的幾項特點：第一是可透過低成本且省時的網版印刷(Screen Printing)技術來定義金屬電極圖案；再者是網印後的高溫燒結步驟可讓正面銀膠直接熔穿抗反射層與重摻雜的n^+區域，形成低阻抗的歐姆接觸界面；第三個特點是可利用共燒讓背鋁與矽晶圓反應，形成具有低載子復合速率的背表面場(Back-surface-field; Al-BSF)。而在最近的十年內，由於鈍化射極與背接觸(Passivated Emitter and Rear Contact; PERC)技術的引進，使

p型電池的效能獲得相當大的提升。和傳統的Al-BSF電池相比，PERC電池的改善部分主要有以下兩點：一是透過表面回蝕(Etch-back)或是低濃度$POCl_3$擴散製程(Reduced Doping)，來降低射極端的摻雜濃度，進而壓低該區的表面復合速率；二是透過雷射消融(Laser Ablation)或網印蝕刻技術(Screen Printing Etch)來降低電池背面的復合速率，從而提升電池的開路電壓。透過以上這兩種改進技術，目前不論在多晶或單晶矽晶圓平台上製作的PERC電池在出產時都可以達到不錯的轉換效率[1-5]。然而，縱使這些技術的引進可以使得p型電池在出產時能有不錯的效能表現，但是由於p型矽材料內部硼氧鍵引致的光致衰減(Light-induced-degradation; LID)現象，導致p型電池在可靠度性能上遠不如n型電池[6]。

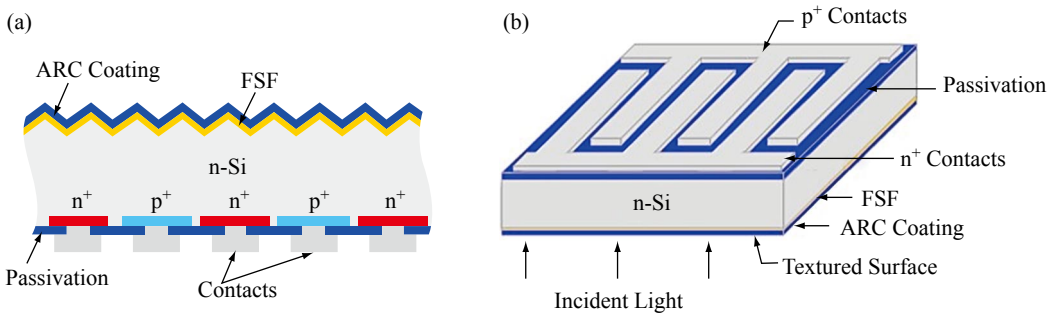
近年來，由於n型晶圓的製造成本逐漸下修至與p型晶圓相仿，許多在n型電池上才能看到的優勢，也因此在實務應用上得以凸顯出來。與p型電池相比，n型電池除了沒有硼氧鍵引致的LID問題之外，n型電池在高溫環境下的穩定度也優於p型電池，可進一步提升光電轉換效率的雙面受光結構也得以在n型晶圓平台上實現。根據這些特點，其實不難想像最高效率的電池結構理應製作在n型晶圓上。以n型晶圓為平台製作的指標性高效率電池有二：異質接面太陽能電池(Heterojunction with Intrinsic Thin Layer; HIT)以及背接觸太陽能電池(Back-contacted Solar Cells; BC)，根據這兩種結構製作的n型電池均可達到23%以上的轉換效率。其中，背接觸太陽能電池可與現行的網印製程兼容，相較於HIT電池，其具有低成本的生產潛力。根據ITRPV的年度報導，在未來十年內，背接觸太陽能電池的市占率將逐步提升至20%~30%[6]，原因有二：一是n型晶圓的生產成本水平逐漸與p型晶圓相當；二則是n型電池的生產技術逐漸成熟所致。在接下來的討論中，我們首先將簡介常見的幾種背接觸太陽能電池，接著討論如何透過網印製程在特定的背接觸結構平台上製作高效率低成本電池，並在文末揭露該類電池的關鍵製程。

背接觸太陽能電池回顧

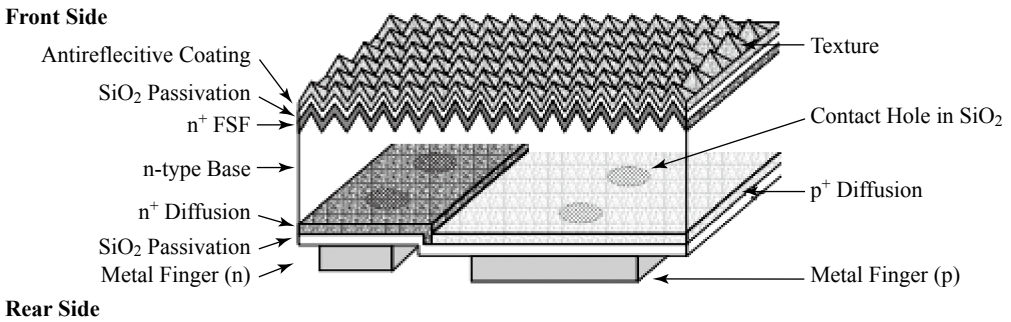
1. 交趾式背接觸太陽能電池(IBC)

交趾式背接觸太陽能電池(Interdigitated Back Contact Solar Cells; IBC)的結構概念最早在1977年被Lammert和Schartz提出[7]，圖一為IBC電池的截面與電極布局示意圖。IBC電池結構有以下幾項特點：第一為受光面電極的移除，這除了可以消彌傳統電池無可避免的遮光損失外，同時更可以透過製程的改善將受光表面的鈍化效果最佳化；第二為正、負電極的同面化（在背接觸電池結構中，正、負電極均位於電池背面），這樣的電極布局帶來的好處有二：一是可以透過最適化的電極比例調配，在現有的材料參數下得到最佳化的電學與鈍化特性；二是在模組化階段，由於正、負電極都位於同一側，故焊接程序比起傳統電池要更為容易。在1986年，Sinton等人在IBC電池中引入「點接觸」技術，透過將金屬接觸面積縮小而達到降低復合電流的效果，大幅提升了電池的開路電壓[8]。

對具有背接觸結構的太陽能電池而言，光生載子必須有足夠長的擴散長度，以保證可以從生成處移動至相應的電極



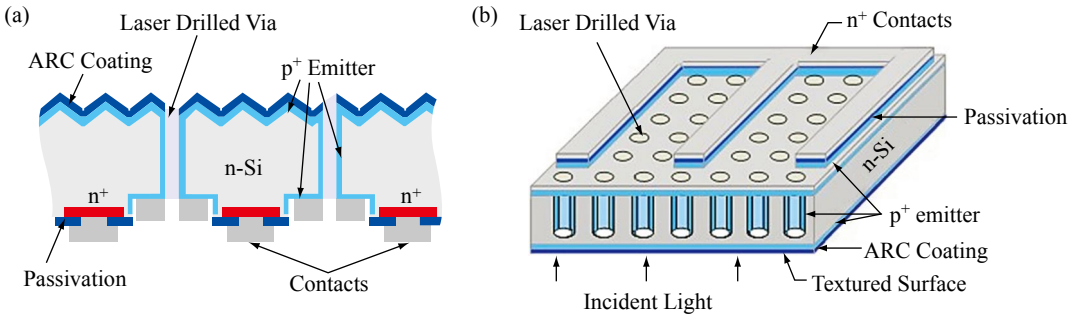
▲圖一　IBC電池之(a)截面圖示；(b)電極布局[7]



▲圖二　SunPower A-300 IBC電池結構示意圖[14]

端，由相應電極收集後透過外部電路產生光電流。擴散長度的定義為$(D\tau_{bulk})1/2$，其中D為少數載子的擴散係數，由晶片的摻雜量決定；τ_{bulk}則代表晶片內部少數載子的生命週期。也就是說，為了最大化載子的收集能力，高的晶片生命週期(Bulk Lifetime)儼然是製作背接觸電池的第一先決條件，這樣的材料要求，只有使用對金屬雜質以及高溫製程耐受度較高的n型晶圓才得以實現[9-10]。一般來說，典型的高效率背接觸電池的製造流程大致如下描述：①n型晶圓經蝕刻步驟形成具織構化的光陷阱結構以提升進光量；②再由蝕刻製程拋光晶圓背面；③分別利用高溫與低溫之$POCl_3$製程形成背表面場(BSF)以及前表面場(FSF)；④透過黃光微影與局部蝕刻步驟定義射極區域；⑤再以高溫硼擴散製程形成p^+射極；⑥電池正面鍍製抗反射層、背面鍍製鈍化層；⑦微影定義點接觸金屬面積；⑧最後以濺鍍或蒸鍍方式製作金屬電極。

第一個商業化的IBC電池由美國SunPower公司達成，近來，其模組效率經NREL認證可達24.1%，這是現行全球太陽能模組的最高效率紀錄。SunPower的A-300型號IBC電池之結構示意圖如圖二。其製造流程大致與上述的典型高效率背接觸電池相似，惟在背面的結構設計有些許不同。他們透過預先鍍製鋁金屬於背面鈍化層上



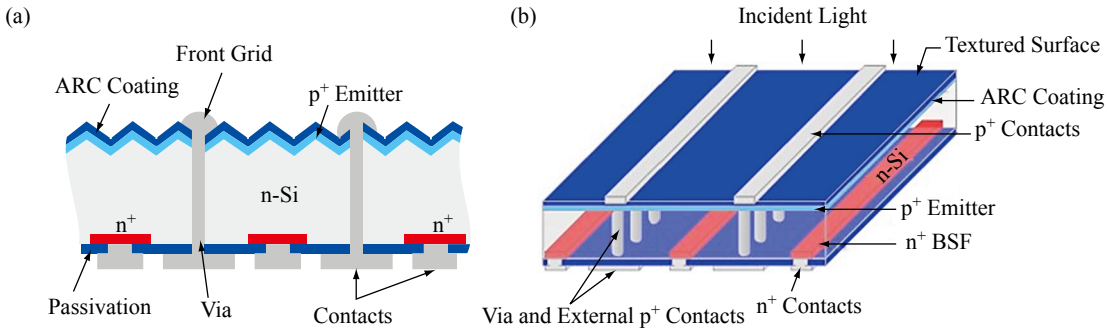
▲圖三　EWT電池之(a)截面圖示；(b)電極布局[24]

以增益電池內反射，緊接著透過電鍍製程(Ni/Cu)形成良好的歐姆接觸與降低電池串聯電阻，最後電池在退火程序形成Ag/Cu接觸後製作完成。於此，我們再次強調FSF的重要性，一個好的FSF不僅可以增進在UV光照下的鈍化品質，同時在低照度情形下也可獲得線性的電流響應[11]。Gong的研究團隊曾針對FSF的摻雜輪廓進行詳盡的研究，他們發現較淺且淡的FSF結構可使電池短路電流得到最大的增益[12]。對IBC電池而言，短路電流除了受到FSF的影響之外，單位電池的寬度(Cell Pitch Size)與射極面積也是決定短路電流的關鍵參數，針對這個議題，Kluska的研究團隊就曾指出為了在IBC電池中達到最大化的短路電流，射極面積應介於單位電池寬度的70%~80%[13]。

對太陽能產業來說，實現低成本製作高效率的太陽能電池，不管對現階段或是可預見的未來而言都是不可或缺的趨勢。為了加速這個趨勢的進程，如何透過現行成熟技術實現低成本電池製程在過去十年內都已被大量的研究，諸如常見的爐管擴散、濕式蝕刻、PECVD氧化物/氮化物沉積、雷射熔蝕、網印製程與網印式的鋁矽合金化射極等均在此列[12,15-20]。這些製程改善的目的只有一個，便是透過低成本的製造技術、常態性的量產轉換效率在20%之上的IBC電池[21]。總體來說，IBC電池的製程門檻雖然受限於高的晶片生命週期要求，但由於晶片阻值與晶片厚度對效率的影響較小，因此平衡了晶片的固有成本[22-23]。

2. 射極貫穿背接觸太陽能電池(EWT)

射極貫穿背接觸太陽能電池(Emitter Wrap-through Solar Cells; EWT)的結構概念最早在1993年由Gee等人提出[24]，其結構示意圖如圖三所示。根據示意圖，可以發現EWT的電池結構與IBC電池相當相似，p、n接觸皆位於電池背面，但有一部分的射極區域鄰近受光表面，正、背面的射極區域透過雷射熔穿的孔洞相互連接，該電池與IBC電池一樣沒有受光面遮光損耗的結構優勢，因此可預期達到較高的短路電流。另一方面，由於射極區域自受光面起始貫穿到電池背面，導致該類電池對少數載子生命週期的要求不若IBC電池這麼嚴苛，換言之，在EWT電池中，僅需較短的少數載子擴散長度便可以有效的收集到光生載子。德國ISFH製造的21.6%電池為現行EWT電池的最高效率紀錄[25]。



▲圖四　MWT電池之(a)截面圖示；(b)電極布局[27]

雖然EWT電池對晶片生命週期的要求不高，但其最致命的問題在於轉換效率往往受限於較低的填充因子，這是由於在雷射熔穿區域的電流擁擠效應所導致的電性損失，透過選用較低阻值的晶片可以顯著的改善垂直射極區域中的電流擁擠現象。目前，大致上有三種方法可以減少雷射熔穿通道造成的填充因子損失，分別有①通道內部的適當金屬填充；②較密集的雷射熔穿間距，以及③具有較低表面濃度的重摻雜射極通道[26]。在上述三種方法中，選擇性射極通道需要極為繁複的製造工藝，這也導致了相對高的製造成本。此外，倘若雷射熔穿通道的金屬填充情形不佳，則會導致高的阻抗路徑，更甚或是無效的電流收集途徑。總體來說，若要使EWT電池得以商業化，提升填充因子與雷射熔穿速率是主要的兩項關鍵。

3. 金屬貫穿背接觸太陽能電池(MWT)

金屬貫穿背接觸太陽能電池(Metallization Wrap-through Solar Cells; MWT)的結構概念最早在1993年由Kerschaver等人提出[27]。MWT的電池結構與傳統的BSF電池相似，其結構圖如圖四所示。根據示意圖，該類電池的射極與指狀電極位於受光面處，但柵狀電極均位於電池背面，正面的金屬指狀電極透過雷射熔穿通道與下方的柵狀電極連結，該結構配置和前述的EWT電池相似，都可以大幅的降低對晶片生命週期的需求。此外，由於現行的網印技術可以應用在MWT電池的製造工藝上，使得該類電池商業化的可能性較EWT電池來得大。同時，由於柵狀電極自受光表面移除的關係，MWT電池的遮光損失比起傳統BSF或主流PERC電池來說要來得更低。目前，該類電池的最高效率紀錄為ECN Solar Energy製造的21%電池[28]。

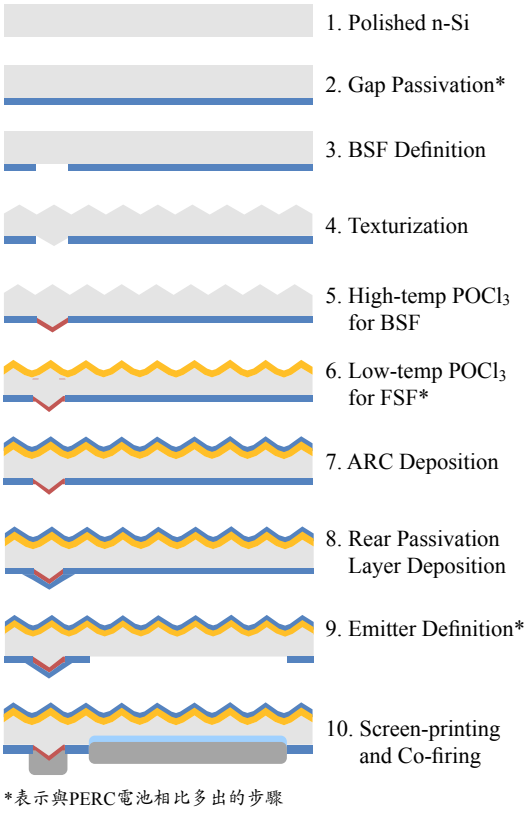
在過去對IBC電池的研究大多都著重於追求轉換效率的最大化，因此需要昂貴的區熔晶圓(Float-zone Wafer)、製作深度擴散的p^+/n^+區域來降低載子收集端的復合電流、以微影製程製作點接觸結構與金屬連線等，這些技術雖然對電池性能的提升有顯著的效果，但卻因成本問題致使高價高效率的IBC電池始終難以成為矽晶太陽能電池的主流產品。為了在IBC電池結構的利基點上尋求突破點，近年來許多研究團隊紛紛投入網印型IBC電池的研究，透過現行的網印技術搭配高效率的IBC電池結構，若能夠

挑選至合適的導電膠料，將使得低成本高效率IBC電池的商業化得以實現。據此，後半段的文章將首先回顧一些網印型IBC電池的相關報導，再來是分享我們的研究團隊近來在網印型IBC電池研究上的一些成果與貢獻。

網印型交趾式背接觸太陽能電池(SP-IBC)與其展望

Woehl等人的研究團隊曾報導過n型網印型交趾式背接觸太陽能電池(Screen-printed Interdigitated Back Contact Solar Cells; SP-IBC)的製造工藝與其光電轉換效能[19]。他們採用的製程與現行的p型電池幾乎完全相同，只是吸收層材料改為n型晶圓並應用IBC電極配置，特別的是，該團隊透過共燒時形成的鋁矽合金結構製作射極，如此一來電池的製造成本便可以大幅地降低；惟製程中使用了大量的阻膠(Masking Resist)，導致製造步驟增加不少。他們製作的SP-IBC電池性能分述如下：J_{SC} = 39.4 mA/cm^2、V_{OC} = 647 mV、FF = 78.4%、η = 20.0%。另一個研究團隊也報導了n型SP-IBC電池的製作方式與性能表現[29]。該團隊透過雙重擴散製程來製作p^+/n^+區域，最後利用網印導電膠料製作電極與金屬導線，該電池的性能分述如下：J_{SC} = 40.54 mA/cm^2、V_{OC} = 655 mV、FF = 73.9%、η = 19.65%。這兩組n型SP-IBC電池的效能表現近乎相當且與現行的p型電池效能相距不遠，但卻仍存有相當大的優化空間，這也表明了網印型IBC電池確有其可發展性。

自2015年開始迄今，我們的研究團隊利用了主流PERC電池的製造技術，在傳統的IBC電極布局與相近的電池規格下（Pitch Size = 1,200 μm、Emitter Area = 850 μm），分別製作了p型與n型兩種SP-IBC電池並進行了詳盡的探究。而在本文中，我們僅側重討論n型SP-IBC的關鍵製程與選用材料對電池性能的影響，欲知悉如何透過一維分析模型解構IBC電池性能與材料參數之間的交互關聯，可參閱我們過往發表的文獻[30-31]。我們所製造的nSP-IBC之製作流程如圖五所示。



▲圖五　nSP-IBC電池製造流程[31]

首先，透過鹼蝕刻步驟拋光原切割晶圓(As-cut Wafer)移除表面缺陷，接著於電池背面沉積鈍化層，以雷射熔蝕定義BSF區域後遂進行矽晶圓表面織構化步驟，在分別以HPM與HF溶液清洗晶片後，再依次透過

高溫、低溫的磷擴散製程製作BSF與FSF，緊接著於電池正、背面鍍製抗反射層與BSF鈍化層，再來同樣透過雷射熔蝕步驟定義射極區域，最後分別在BSF上網印銀膠；在射極端網印鋁膠後進行燒結製程，在共燒階段銀膠會熔穿下方的鈍化層與BSF形成歐姆接觸，另一方面，鋁矽合金化過程也使得射極端與其金屬導線可以同步在共燒階段形成。我們製造的p型與n型SP-IBC電池性能分述如下：①pSP-IBC：J_{SC} = 40.15 mA/cm^2、V_{OC} = 645 mV、FF = 77.51%、η = 20.08%；②nSP-IBC：J_{SC} = 41.21 mA/cm^2、V_{OC} = 685 mV、FF = 78.48%、η = 22.15%。nSP-IBC在電池性能上有較好的表現，主要可歸因於以下幾項參數的改進（文後列舉的參數比較順序為nSP-IBC、pSP-IBC）：①在受光面具有更低的表面復合速率（$S_{eff,FSF}$ = 0.447 cm/s、$S_{eff,FFE}$ = 15 cm/s），再加上較長的擴散長度（L_A = 1,241 μm、L_n = 1,039 μm），致使在受光面處有更佳的光生載子收集能力；②較低的射極復合電流（$J_{0,p^+\text{-emitter}}$ ≈ 70 fA/cm^2、$J_{0,n^+\text{-emitter}}$ ≈ 390 fA/cm^2），導致較高的開路電壓，以及③操作在高階注入(High Level Injection; HLI)狀態使得晶片內部與BSF指狀電極末端的串聯電阻損失得以降低（$R_{S,nSP\text{-}IBC}$ ≈ 0.57 Ω-cm^2、$R_{S,pSP\text{-}IBC}$ ≈ 0.69 Ω-cm^2），從而得到較高的填充因子。

值得一提的是，當電池操作在HLI狀態時（Δn_{avg} (@V_{OC}) >> 10N_{base}，Δn為少數載子之平均濃度，N_{base}為晶片之摻雜濃度），電池性能的解析方式與低階注入(Low Level Injection; LLI)狀態有很大的不同。例如上一段提及的擴散長度，在HLI情況下由於晶片內的少數載子濃度與多數載子濃度相當，因此在垂直方向的載子擴散長度需由兩種載子共同決定；相反的，在LLI情況下，垂直方向的擴散長度僅與少數載子的擴散係數和生命週期有關。此外，在HLI狀態下，需撇除晶片內部的復合電流($J_{0,bulk}$)才可以透過解析方程式計算電池的開路電壓，換句話說，在HLI狀態下，電池的開路電壓主要由各層表面的復合電流總和決定，而$J_{0,bulk}$則需歸類至J_{02}項（在LLI狀態下，J_{02}通常表示空乏區(Space Charge Region; SCR)貢獻的復合電流，故亦作$J_{0,scr}$），這項物理參數則與晶片的生命週期密切相關，透過選用高生命週期的晶片，可以有效地消弭J_{02}造成的開路電壓損失。必須注意的是，在HLI狀態下無法精確地透過解析式估算電池內部與晶片阻值相關的電阻，如前述提及的晶片內阻與指狀電極末端展阻，故而在分析時，會先分別計算HLI與LLI狀態下的串聯電阻後，再加以評斷電池實際上的操作區間。

nSP-IBC的關鍵製程在於雷射熔蝕後的晶片清洗步驟。由於雷射製程是在大氣環境下進行，在熔蝕過程中矽晶片表面會與周遭氣氛中的氧氣反應進而生成矽氧化層，需透過氫氟酸(Hydrofluoric Acid; HF)將這層氧化物移除，印製在熔蝕區上的鋁膠才可在燒結過程中和矽晶片反應形成鋁矽合金化射極。若沒有進行HF步驟，在製造流程不變的情況下，nSP-IBC的電池性能將變為J_{SC} = 14.16 mA/cm^2、V_{OC} = 340 mV、FF = 47.60%、η = 2.29%，效率驟降為原先性能的1/10，足見雷射後蝕刻製程的重要性。除了透過HF蝕刻步驟移除雷射引致的氧化層之外，亦可以透過選用皮秒或飛秒雷射來解決電池性能折損的問題[32]。另一個關鍵是以磷擴散製程製作BSF與FSF時存在溢鍍問題，使得現行的製程難以製備出

全電池面積(6″)的IBC結構，此項問題則需倚靠製程設備的改良方得以解決。

最後，我們討論在單位電池間距尺寸不變的情況下，如何進一步改善電池效率。當晶片生命週期提升至10 ms，在射極面積不變的情況下($A_{emitter}$ = 70%)，填充因子可提升至將近81%，而轉換效率可躍升至23.44%，若進一步限縮射極面積至15%，開路電壓將可突破700 mV，而效率可增加至23.82%。另一個改善電池效率的方式是選用低阻值的晶片作為電池的製造平台，若將晶片阻值降至1 Ω-cm，在此狀態下J_{02}的影響近乎可以忽略的緣故，使得填充因子可大幅提升至81.64%，但由於此時電池操作在LLI，$J_{0,bulk}$需重新納入總復合電流內，因此，在射極面積不變的情況下，其轉換效率僅增幅至22.93%，進一步限縮射極面積後，轉換效率可達23.15%。比較以上兩種方法，不難發現透過提升晶片生命週期似乎是較佳的方案，但根據過往的經驗，高溫製程很有可能會造成晶片生命週期的衰減。倘若高溫製程對晶片生命週期的負面影響得以消除，且當n型晶圓的價格與p型晶圓相仿時，上述提及的兩種方法都具備了量產的可行性。

結　論

矽晶電池在產業上已有舉足輕重之地位，將會是不易被取代的主流產品。我們的SP-IBC電池研究成功地證明了現行的主流PERC技術可以用來製造高效率n-IBC電池(η > 22%)，這使得大面積的低成本高效率IBC電池不再只是空談，而是具有商業化的可能性。再加上製造成本逐年下降的n型晶圓，我們認為只要能移植現有的p型電池製程到n型電池上，並持續改進電池性能就可以在市場上有佳績表現。

誌　謝

本研究工作承蒙經濟部能源局贊助，謹此致謝。

參考文獻

1. J. Schmidt, A. Merkle, R. Brendel, B. Hoex, and B. Hoex, “Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by atomic-layer-deposited Al_2O_3,” Progress in Photovoltaics 16, 461 (2008).
2. T. Dullweber, S. Gatz, H. Hannebauer, T. Falcon, R. Hesse, J. Schmidt, et al., “Towards 20% efficient large-area screen-printed rear-passivated silicon solar cells,” Progress in Photovoltaics 20, 630 (2012).
3. B. Hallam, A. Uruena, R. Russell, M. Aleman, M. Abbott, C. Dang, et al., “Efficiency enhancement of i-PERC solar cells by implementation of a laser doped selective emitter,” Solar Energy Materials and Solar Cells 134, 89 (2015).
4. A. Metz, D. Adler, S. Bagus, H. Blanke, M. Bothar, E. Brouwer, et al., “Industrial high performance crystalline silicon solar cells and modules based on rear surface passivation technology,” Solar Energy Materials and Solar Cells 120, 417 (2014).
5. Weiwei Deng, Daming Chen, Zhen Xiong, Pierre Jacques Verlinden, Jianwen Dong, Feng Ye, “20.8 percent of p-type multicrystalline PERC solar cell on 156 mm-156 mm p-type multicrystalline silicon substrate,” IEEE Journal of Photovoltaics 6, 3 (2016).
6. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) Results 2017 incl. maturity repot, 9th edition 2018. Available: http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/
7. M.D. Lammert and R.J. Schwartz, “The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight,” IEEE Translations on Electron Devices 24(4), 337 (1997).
8. R.A. Sinton, Y. Kwark, J.Y. Gan, and R.M. Swanson, “27.5 percent silicon concentrator solar cells,” IEEE Electron Device Letters EDL-7(10), 567 (1986).
9. B. Aïssa, M.M. Kicambe, M.I. Hossain, O.E. Daif, A.A. Abdallah, F. Ali, and N. Tabet, “Emerging frontiers of n-type silicon material for photovoltaic applications: the impurity-defect interactions,” Frontiers in Nanoscience and Nanotechnology 1(1), 2 (2015).
10. D. Macdonald and L.J. Geerligs, “Recombination activity

of interstitial iron and other transition metal point defects in p- and n-type crystalline silicon," Applied Physics Letters 85, 4061 (2004).

11. F. Granek, M. Hermle, C. Reichel, O. Schultz-Wittmann, S.W. Glunz, "High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cell research at Frauhofer ISE," Proceeding of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 991 (2008).
12. C. Gong, E. Van Kerschaver, J. Robbelein, T. Janssens, N. Posthuma, J. Poortmans, and R. Mertens, "Screen-printed aluminum-alloyed p+ emitter on high-efficiency n-type interdigitated back-contact silicon solar cells," IEEE Electron Device Letters 31(6), 576 (2010).
13. S. Kluska, F. Granek, M. Rüdiger, M. Hermle, S.W. Glunz , "Modeling and optimization study of industrial n-type high-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells 94, 568 (2010).
14. W.P. Mulligan, D.H. Rose, M.J. Cudzinovic, D.M. De Ceuster, K.R. McIntosh, D.D. Smith, and R.M. Swanson, "Manufacture of solar cells with 21% efficiency," Proceeding of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 387, (2004).
15. R. Bock, S. Mau, J. Schmidt, and R. Brendel, "Back-junction back contact n-type silicon solar cells with screen-printed aluminum-alloyed emitter," Applied Physics Letters 96, 263507-1 (2010).
16. C. Gong, S. Singh, J. Robbelein, N. Posthuma, E.V. Kerschaver, J. Poortmans, and R. Mertens, "High efficient n-type back junction back-contact silicon solar cells with screen-printed al-alloyed emitter and effective emitter passivation study," Progress Photovoltaics 19, 781 (2010).
17. R. Woehl, J. Krause, F. Granek, and D. Biro, "19.7% efficient all-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cell with aluminum-alloyed emitter," IEEE Electron Device Letters 32(3), 345 (2011).
18. R. Woehl, J. Krause, F. Granek, and D. Biro, "Highly-efficient all-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cells with aluminum-alloyed emitter," Energy Procedia 8, 17 (2011).
19. R. Woehl, M. Rüdiger, and D. Biro, J. Wilde, "All-screen-printed back-contact back-junction silicon solar cells with aluminum-alloyed emitter and demonstration of interconnection of point-shaped metalized contacts," Progress Photovoltaics 23, 226 (2015).
20. G. Scardera, D. Inns, D. Wang, S. Dugan, J. Dee, T. Dang, K. Bendimerad, F. Lemmi, and H. Antoniadis, "All-screen-printed dopant paste interdigitated back contact solar cell," Energy Procedia 77, 271 (2015).
21. F.J. Cataño, D. Morecroft, M. Cascant, H. Yuste, M.W.P.E. Lamers, A.A. Mewe, I.G. Romijn, E.E. Bende, Y. Komatsu, A.W. Weeber, and I. Cesar, "Industrially feasible >19% efficiency IBC cells for pilot line processing," Proceeding of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Valencia, Spain, 1038 (2011).
22. F. Granek, M. Hermle, D.M. Huljić, O. Schultz-Wittmann, and S.W. Glunz, "Enhanced lateral current transport via the front n^+ diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells," Progress Photovoltaics 17, 47 (2009).
23. F. Granek, "High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells," Ph.D. thesis (2009).
24. J.M. Gee, W.K. Schuber, and P.A. Basore, "Emitter wrap-through solar cell," Proceeding of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, Kentucky, 265 (1993).
25. F. Kiefer, C. Ulzhöfer, T. Brendemühl, N.-P. Harder, R. Brendel, V. Mertens, S. Bordihn, C. Peters, and J. W. Müller, "High efficiency n-type emitter-wrap-through silicon solar cells," IEEE Journal of Photovoltaics 1(1), 49 (2011).
26. C. Ulzhöfer, P.P. Altermatt, N.-P. Harder, and R. Brendel, "Loss analysis of emitter-wrap-through silicon solar cells by means of experiment and three-dimensional device modeling," Journal of Applied Physics 107, 104509 (2010).
27. E. van Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, "A novel silicon solar cell structure with both external polarity contacts on the back surface," Proceeding of the 2nd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vienna, Austria, 1479 (1998).
28. B.K. Newman, E.E. Bende, B.B. Van Aken, M. Koppes, L.A.G. Okel, J. Loffler, I.G. Romijn, A. Gutjahr, C.J.J. Tool, N. Guillevin, L.J. Geerligs, J. Wang, J. Zhai, Z. Wang, Y. Chen, Y. Wang, and D. Liu, "Manipulating reverse current in 21% n-MWT cells," Proceeding of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 829 (2015).
29. J. Dong, L. Tao, Y. Zhu, Z. Yang, Z. Xia, R. Sidhu, and G. Xing, "High-efficiency full back contacted cells using industrial processes," IEEE Journal of Photovoltaics 4, 130 (2014).
30. P.Y. Hsin, Y.W. Peng, and J.Y. Gan, "High efficiency screen-printed p-Si interdigitated back contact cells: fabrication and analytical characterization," IEEE Journal of Photovoltaics 7(5), 1284 (2017).
31. Y.W. Peng, C.H. Chen, L.Y. Li, P.Y. Hsin, P. Yu, C.J. Huang, and J.Y. Gan, "Design, fabrication and characterization of n-Si IBC solar cells using PERC technology," IEEE Journal of Photovoltaics, to be published.
32. Z. Du. C. Zhang, F. Li, R. Zhou, M. Hong, "Impact of laser-induced oxidation on silicon wafer solar cell's performance," IEEE Journal of Photovoltaics; 6, 617 (2016).