

太陽電池銅電極技術發展趨勢

Progress Report on the Copper Electrode Metallization Silicon Solar Cells

李立宇 L.Y. Li¹、陳秉群 B. C. Chen¹、杜政勳 C. H. Du² 林福銘 F. M. Lin³、王孟智 Bevis Wang⁴、李育舟 Y. C. Lee⁵ 工研院緑能所(GEL/ITRI)¹副研究員、²經理、³組長 太極能源科技(股)公司(Tainergy Tech co., Ltd)⁴工程師、⁵協理

目前商業化之矽晶太陽電池電極普遍使用網版印刷的銀導電膠,但隨著國際銀價的逐年持續 攀升,因此,有必要開發適當的新材料電極技術。由於銅價較銀價便宜約百倍,而其導電特 性卻相當,故銅電極技術具有相當優勢與發展潛力。本文將簡要介紹銅電極技術的發展與現況。

Nowadays, the most widely used industrial method for the front contacts of the silicon base solar cells are the silver paste screen-printing. In order to cost reduction, the methods to substituted silver paste are researched in recent years. The most potential is the copper electrode metallization. For the cost of copper is about a hundred times cheaper than silver, but the copper has similarly high conductivity to silver. In this report, we summarize the research and development of the copper electrode metallization in current industries and laboratories.

關鍵詞/Key Words

銅電極(Copper Electrode)、銅電鍍(Copper Plating)、銅膠(Copper Paste)、高效率太陽電池 (High Efficiency Solar Cells)、PSG太陽電池(PSG Solar Cells)

前言

見今商業化之矽晶太陽電池正朝著高效 率與低成本的方向努力,其中傳統 太陽電池的正面電極仍普遍使用需要高溫 燒結的銀導電膠電極。隨著國際銀價的逐 年攀升,使銀導電膠佔了約一成左右的電 池成本,因此近幾年來,取代銀導電膠之 電極技術開發正如火如荼地展開,其中以 銅電極技術最具發展潛力。從表一可以看 到,銅與銀有相當的導電特性,但銅之售 價卻較銀便宜近百倍,故銅的開發普遍被 看好。銅電極技術的發展可分為銅電鍍電 極技術以及銅導電膠電極技術兩個方向進 行,各有其優缺點,以下將一一闡述。

銅電鍍電極技術

由於電鍍技術在其他領域發展與應用 已經很多年,為一個很成熟且常見的技術, 且是一個快速、便宜、低溫、非真空與可 量產的金屬成長技術。在所有金屬之中, 考量成本以及導電特性等,銅為取代銀之



	Silver	Copper	Nickel
Cost (USD/Kg)	575.31	6.69	15.6

63.01

59.6

13.9

▼表一 銀、銅與鎳金屬之價格與特性^(1,2)

Conductivity (10⁶ S/m)

最佳選擇。根據圖一,2014年SEMI International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)⁽³⁾預測,銅電鍍電極技術將於2018 年導入量產階段。圖二(a)為常見傳統的網 印銀膠電極之p型太陽電池,圖二(b)則為銅 電鍍電極p型太陽電池,從該示意圖可以發 現,銅電鍍電極為鎳、銅與錫之堆疊層, 由鎳作為種子層(Seed Layer)與擴散阻障層 (Diffusion Layer),銅則為主要導電層,而 錫當作防止氧化之保護層(Capping Layer), 由於該層不須太厚,約150 nm即可,也有研 究單位用銀當作保護層。

由於銅在常溫狀態下,在矽基材的 擴散係數很高,為2.8·10⁻⁷ cm²/s⁽⁴⁾,銅在本 質的矽基材中只需1分鐘即可走10 μm的深 度,容易擴散形成深層能階缺陷,因此銅 與矽基材中必須有一層擴散阻障層,而這 層也可以做為後續電鍍銅之種子層。一般 常見的擴散阻障層,以過渡金屬或其氮化 物與矽化物為主,如鎳(Ni)、鉭(Ta)、鈦



▲圖一 ITRPV預測銅電極將於2018年進入量產³³

(Ti)、鎬(W)、鉻(Cr)和鉬(Mo)等。銅電鍍電 極技術分為下列三種方式⁽⁵⁾:

①銅電鍍在網印銀膠,藉此降低銀膠
的使用量,雖製程差異小,但仍需用到銀
膠目遮蔭面積較大。

②銅電鍍在物理氣相沉積(PVD)的金屬 層上,可用來選擇與驗證種子層或阻障層 之金屬材料,但須用到黃光製程,製程繁複 且成本高,不適合用於太陽電池量產上。

③直接電鍍法,結合雷射開線與摻雜 技術,直接在開孔區域電鍍上金屬電極, 此技術成本低,最具發展潛力。

其中直接電鍍法在近幾年來被熱烈地 探討與研究,因為此法集低成本、自我校準 與高效率之優點於一身,被視為取代銀膠 之解決方案。主要原因為以下兩點,第一 點為可搭配雷射開孔技術,由於雷射能造 成瞬間局部高溫之原理,選擇適當的雷射 源,可輕易且快速地挖除並對太陽電池表 面的抗反射層圖形化,使欲鍍的矽表面能 裸露出來,藉此可避免使用傳統黃光高成 本目繁複的製程。再者,此雷射開孔技術 可利用在欲開孔處,塗佈或注入摻雜源, 可同時達到局部開孔與摻雜之雙重效果, 以形成高低接面(High-low Junction)之選擇 性射極(Selective Emitter)之結構(6-9);再加上 雷射束本身的光斑(Spot Size)很小,因此可 輕易劃出小於10 µm的細線。第二點則為直





接電鍍法,可直接在雷射開孔之矽裸露處, 使用電化學沉積方式鍍上鎳層,以做為接 下來鍍銅之種子層或阻障層。當對鎳層與 矽基材加熱時,會形成鎳矽化合物(Nickel Silicide),能大幅降低接觸阻抗⁽¹⁰⁻¹²⁾, 可在很低摻雜表面濃度N_s~10¹⁹ cm⁻³的射極擁 有很低的接觸阻抗⁽¹³⁾,可應用在高效率太陽 電池;目該鎳矽化合物可增加鎳與矽之附 著力(Adhesion)⁽¹⁴⁾。

而電化學沉積的方式,基本上分為無 電鍍(Electroless Plating)與電鍍(Electroplating),另外,拜太陽電池特性所賜,還有改 良型照光的電化學沉積方式,光誘發無電 鍍(Light Induce Electroless Plating)與光誘發 電鍍(Light Induce Electroplating)。

1. 無電鍍

初期電化學沉積較多研究團隊採用無 電鍍的方式,而無電鍍又可稱為自催化鍍 (Autocatalytic Plating),其原理主要為利用 強還原劑催使進行氧化還原反應,使金屬 離子還原沉積在欲鍍處而形成金屬層。通 常其無電鍍的鍍浴組成,以提供金屬離子 (Nickel Cations)的鹽類、還原劑(Reducing Agent)、錯合劑(Complexing Agent)、pH調 整劑與許多添加劑。我們用無電鍍鎳搭配 次磷酸鈉(Sodium Hypophosphite; NaH₂PO₂) 當還原劑作為例子,從式(1)可以看到還原 劑的次磷酸鈉會在鍍液中被氧化成亞磷酸 根離子,並釋出電荷,該電荷會使鎳離子 在欲鍍處還原形成鎳層⁽¹⁵⁾。

 $Ni^{2^{+}} + 2H_2PO_2^{-} + 2H_2O \rightarrow Ni + H_2 + 4H^{+} + 2HPO_3^{2^{-}}$

(1)

該鎳層是由鎳與鎳磷合金所組成的,

其組態由鍍浴的pH值、溫度與次磷酸濃度 所決定,其磷的含量約為2~8%。雖然無 電鍍鎳有很好的均匀性目能輕易地鍍在半 導體材料甚至是非導體材料上,卻有鍍率 慢、高成本等缺點。像BP Solar初期採用無 電鍍的方式來做為埋入式太陽電池(Buried Contact Solar Cell)之電極,但後來以電鍍來 取代無電鍍⁽¹⁶⁾,不會影響效率,目能大幅增 加生產速度與降低成本。

2. 光誘發無電鍍

此方式為無電鍍之改良,主要利用欲 鍍物為太陽電池之特性,在槽體外加光源 使電池受光,從圖二(b)之太陽電池示意圖 可以得知,p型的太陽電池在照光後,吸光 產生電子與電洞對,並會受電池内建電場 而分離,其電子會移動到n型射極區域,而 n型射極區恰為浴鍍面,故能加速金屬離子 還原反應,因此稱作光誘發無電鍍(Light Induce Electroless Plating; LIEP)^(17,18)。此方式 雖可以加速鍍率,但本質卻仍無法擺脫無 電鍍之劣勢。

3. 電鍍

電鍍則為利用電解(Electrolysis)反 應,當鍍浴受到外加偏壓時,電解質的陽 離子會向陰極移動,而陰離子則是向陽極 移動。若將欲鍍物作為陰極,並浸泡於含 欲鍍金屬離子之鍍浴中,且同時另一邊放 置欲鍍的金屬塊作為陽極,而鍍浴中的金 屬離子則會在陰極接受電子而析出形成金 屬層。由於此反應只會造成陽極的金屬溶 解,鍍浴中的離子濃度不變,因此可以有 很好的監控與維護,普遍應用在半導體封 裝、印刷電路板與傳統產業中,但適合用 在金屬導體或導電性較佳之基材。



▲圖三 光誘發電鍍之示意圖(20)

4. 光誘發電鍍

光誘發電鍍(Light Induce Plating; LIP) 為電鍍的改良版,原理與光誘發無電鍍很 像,皆是利用太陽電池的特性,在鍍浴槽 體外加光源,當太陽電池受光會產生電子 與電洞對,其光誘發之電子會跑至n型射極 區域,與鍍浴中的金屬離子結合,還原沉 積金屬層;而電洞則往p型區與背電極區移 動,倘若此時沒有對電池施以偏壓的話, 則會使背電極被氧化(Oxidised),造成背 電極鋁膠的金屬離子會跑至鍍浴中(19)。相 對地,若在電池的背電極施以偏壓的話,

Electro-Ag Electro-Cu LIP N

▲圖四 銅電鍍電極之FIB與SEM截面圖⁽²²⁾

如圖三示意圖,將會降低背電極被腐蝕析 出,目會使電鍍之電流密度接近其電池的 短路電流,能有效加快電鍍之鍍率⁽²⁰⁾,而電 鍍之鍍率會與照光強度有關⁽²¹⁾。此方式為 目前銅電鍍電極之主流方式,普遍認為是 未來量產最可行的方式。如圖四為IMEC與 Besi MECO研究團隊,先利用光誘發電鍍鎳 在雷射開孔處沉積鎳層,有了此種子層, 接著再以電鍍銅或是光誘發電鍍銅方式來 沉積銅之導電層,最後用上很薄的銀做為 保護層以防止銅氧化⁽²²⁾。

銅電鍍電極之關鍵技術

銅電鍍電極技術雖然擁有低溫、低成 本與高效率等優點,但仍有幾個關鍵點須 克服,如下列所示:

①製程繁複性:相較於傳統網印方 式,銅電鍍電極技術需要鍍上鎳、銅與銀 或錫等金屬,雖然不需傳統銀膠750~850°C 之高溫燒結,但仍需要250~450°C低溫的退 火來增加物性與電性。故在製程調整與機 台設計需多方考量。

②表面溢鍍(Background Plating):又 可稱為Ghost Plating或Over Plating,其造 成的原因可以分為很多層面,像是矽基

> 材表面或本身的雜質 (Impurity)、懸浮粒子 (Particle)與内裂(Creak) 等,易造成表面的鈍化 層(Passivation Layer) 或抗 反射層(Anti-reflection Layer)容易出現小孔隙 (Pinhole)⁽²³⁾,使得在電鍍 製程中,鍍在小孔隙上造 成遮光、短路等缺點,如 圖五所示⁽²⁴⁾。對此現象,







▲圖五 銅電鍍電極之表面溢鍍現象⁽²⁴⁾

其電池製程中的清洗與低機械應力操作, 以及電鍍前處理(Treatment)皆能有效避免此 現象發生⁽²⁴⁾。

③均匀的鎳層:該鎳層做為鍍銅的種 子層與阻障層,且退火形成鎳矽化成物, 可降低接觸阻抗以及增加電極之附著力, 故為銅電鍍電極技術之主要關鍵。因此, 如何沉積均匀的鎳層是很重要的課題,舉 凡從雷射開孔將鈍化層或抗反射層移除, 到電鍍前處理將其表面氧化層移除,以及 電鍍之鍍浴成分與操作條件皆會影響。也 有研究單位提出,利用二步驟光誘發電鍍 鎳沉積方式來達到此目的⁽²⁵⁾。

④可靠度(Reliability):銅電鍍電極 之附著力(Adhesion)與可靠度,一直被視 為最大的難題。但如前文所述,其雷射開 孔、均匀的鎳層、合適的射極深度(26)、適 當的鎳矽化合物與各層金屬的匹配,皆是 關鍵。近期有許多研究單位與廠商皆提出 解決方案,如圖六(a),IMEC與Besi MECO 研究團隊所執行之銅電鍍電極在45度拉力 測試(Peel Test)中,拉力可大於2N⁽²²⁾,且 該模組通過IEC61215的溫度循環(Thermal Cycling) 與濕熱試驗(Damp Heat)測試^(22,27)。 而在2014年29屆歐洲太陽光電展(EU PVSEC)中, Fraunhofer ISE、Rena GmbH、 MacDermid Inc.與InnoLas Solution GmbH 研究團隊也提出雷射、藥水、設備等一套 完整的銅電鍍電極解決方案,其銅電鍍電 極在90度拉力測試(Peel Test),拉力也可大 於2N^(28,29),如圖六(b)所示,目模組也通過 IEC61215的溫度循環與濕熱試驗測試。

銅電鍍電極之太陽電池

表二為目前應用銅電鍍電極之高效 率太陽電池整理。因銅電鍍電極之鎳矽化 合物,能選擇低摻雜濃度之射極⁽¹³⁾,且沒 有網印網版線寬的限制,可輕易達到小於 40 µm的線寬,再加上為非真空且低溫製



▲圖六 (a)IMEC為首研究團隊之銅電鍍電極拉力測試結果⁽²²⁾: (b)Fraunhofer ISE為首研究團隊之銅電鍍電極 拉力測試結果^(28,29)

研究單位	電池種類	V _{oc} (mV)	J _{SC} (mA/cm ²)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)	Reference
Kaneka / IMEC	HJT	738.3	40.02	81.9	24.2	30
Meyer Burger	HJT	736.7	38.64	81.3	22.3	31
IMEC	p-PERC	661.7	39.1	80.0	20.7	32
IMEC	n-PERT	677	39.1	81.3	21.5	33
Fraunhofer ISE	p-LDSE	640	38.1	80.3	19.6	28
Fraunhofer ISE	p-PERC (Foil)	657	40.4	80.2	21.3	34
Fraunhofer ISE	p-PERC	662.1	39.8	79.7	20.99	29
Fraunhofer ISE	n-PERL	667	39.6	81.2	21.74	35
Hyundai Heavy Industries	LDSE	635	39.1	79.8	19.8	36
Hyundai Heavy Industries	p-PERL	664.4	39.92	77.46	20.55	37
UNSW	LDSE	638.3	38.43	78.82	19.33	38
UNSW	n-Bifacial	632	40.7	75.0	19.2	39
ECN / IMEC	n-MWT	656	40.3	79.4	21	40
ECN / IMEC	n-Bifacial	654	39.2	80.0	20.4	41

▼表二 銅電鍍電極之高效率太陽電池效率比較表

程(≦400°C),故為邁向高效率且低成本太 陽電池之最佳途徑。如異質介面太陽電池 (Hetero-Junction; HJT), 因非晶砂(Amorphoourse Silicon)無法承受高溫製程,否則 鈍化效果與效率會大幅衰退;而銅電鍍電 極恰符合需求,日本Kaneka應用銅電鍍電 極技術,使效率表現達到24.2%⁽³⁰⁾。而現 今商規p型太陽電池,若搭配雷射摻雜技 術(Laser Doping Selective Emitter; LDSE)與 銅電極技術,則能使效率拉高至19.6%以 上^(28,36)。若是p型或n型高效率結構,如鈍 化射極與背面太陽電池(Passivated Emitter and Rear Cell; PERC)或是鈍化射極與局部擴 散太陽電池Passivated Emitter and Rear Locally Diffused; PERL), 其電池效率表現皆在 20.5%以上^(29,21-35,37),最高來到21.3%⁽³⁴⁾。

銅導電膠電極技術

若考量到現有的技術與設備能直接 轉移,畢竟網版印刷技術之工藝已非常成 熟,且對現在廠商而言,網印與燒結設備 若能接續使用,設備不汰換考量下,用銅 導電膠來取代導電銀膠將是一個很好的選 擇。對於銅膠而言,有兩個重要的關鍵需 要克服,一為銅容易氧化之問題,以及銅 擴散至矽基材之疑慮。

而日本產總研(AIST)提出用介金屬化 合物(Intermetallic Compound; IMC)來防止燒 結時,銅的氧化與擴散的問題(42),利用低融 化點合金(Low-melting-point Alloy; LMPA)、 金屬銅、熱固性聚合物(Thermosetting Polymer)與溶劑(Solvent)製成導電銅膠。圖七 為導電銅膠在燒結後之SEM圖,由於在燒 結的過程中,會形成介金屬化合物將銅包 覆起來的現象,因此可以防止銅氧化與擴 散(43)。而低融化點合金粒徑大小的選擇與製 程將是影響包覆銅的關鍵,若包覆較差, 則會像圖七(a)一樣,容易出現空孔(Void) 的現象,使得銅氧化甚至擴散到矽基材 中,導致電池效率受影響。而AIST提出一 種奈米化方式(Nanomized Method),可以挑 選相近的粒徑,不會有大有小造成包覆較





▲圖七 (a)傳統導電銅膠電極與(b)AIST奈米化 方式銅膠電極之SEM截面圖⁽⁴³⁾

差之現象,如圖七(b),沒有空孔產生。

東北大學的小池純一教授則提出具高 導電之導電銅膠,如圖八(a)SEM圖所示, 該銅膠可形成寬63與高24微米之矽線, 且從圖八(b)可以看到,該銅膠電極經過 450~600°C高溫燒結,可達3~6 μΩ·cm低電 阻率之特性⁽⁴⁴⁾。

工研院銅電極太陽電池之 發展現況

在333期工業材料雜誌中曾介紹工研院 PSG矽晶太陽電池技術⁽⁴⁵⁾,首度提出保留含 磷氧化層(磷玻璃層),打破傳統製程中, 會將此含磷氧化層(磷玻璃層)去除掉的做

▼表三 工研院雷射摻雜技術之數據表

	初始射極之 片電阻值	雷射掺杂後 射极之片电阻值
磷酸 (Phosphoric Acid)	95 (Ω/sq.)	55 (Ω/sq.)
含磷氧化層 (P ₂ O ₅ Layer)		20 (Ω/sq.)

法。經過製程與參數的調整,該層不會影 響光學特性目能作為鈍化層,使其具有良 好的表面鈍化效果,目有抗電位誘發衰減 (Potential Induced Degradation; PID)的效果。 而PSG矽晶太陽電池技術也可搭配雷射做選 擇性射極太陽電池,利用該磷氧化層,不 須額外的摻雜源,即可利用雷射同時達到 局部開孔與重摻雜之雙重效果,從表三中 的數據,可以發現含磷氧化層(P₂O₅ Layer) 能更有效的摻雜,以形成高低接面之選擇 性射極結構。

而針對銅電極技術,工研院選擇開發 銅電鍍電極技術,一路從早期的無電鍍、 光誘發電鍍、電鍍到現在熱門的光誘發電 鍍,持續演化而來,進而建立一套實驗室 標準的銅電鍍電極技術。我們除了能在n型



(a)銅膠電極導線之 SEM圖:(b)銅膠電 極經燒結後之電阻 率數據圖

▶圖八





▲圖九 (a)PSG與網印銀膠電極太陽電池: (b)PSG與電鍍電極太陽電池與(c)PSG與電鍍電極PERC太陽電池 示意圖

#	$J_{SC}(mA/cm^2)$	V _{oc} (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)	Note
Pilot Line	37.81	0.625	80.08	18.93	網印銀膠電極
PSG	38.22	0.643	80.06	19.69	網印銀膠電極
PSG	38.78	0.643	79.39	19.81	銅電鍍電極
PERC with PSG	39.02	0.652	78.67	20.02	銅電鍍電極

▼表四	工研院PSG與電鍍電極太陽電池之數據表

區域形成銅電鍍電極外,也可在p型區域利 用偏壓的方式⁽³⁵⁾,在該區域電鍍上銅電鍍電 極。若結合工研院之n型與p型雷射摻雜技 術,搭配工研院銅電鍍電極技術,能在太 陽電池做到雙面銅電鍍電極。圖九(a)為工 研院PSG搭配傳統網印銀膠電極之太陽電池 結構,從表四可以看到其效率較傳統標準 製程高出許多,倘若搭配工研院雷射摻雜 技術與低溫銅電鍍電極技術,能使效率達 到19.81%,當然若結合背面鈍化的PERC結 構,能使效率突破20%大關。

結論

太陽電池銅電極技術是目前能達到低 成本、高效率太陽電池之唯一途徑。而目前 兩種銅電極技術,各有其優缺點。導電銅 膠電極技術,雖能在不汰換現有設備下, 為無痛轉移之解決方案,但未來仍無法避 冤網版印刷之線寬限制,因而受限。相較 之下,銅電鍍電極技術就相當具有優勢, 由於搭配雷射開孔與摻雜技術,線寬能小 於40 μm, 目為自我校準(Self Alignment) 雷極成形技術。而銅電鍍電極之鎳矽化合 物,除了可增加介面附著力與防止銅擴散 之外,並擁有低接觸阻抗之特性,為低表 面濃度之高效率太陽電池的電極首選。如 上述表二,舉凡如HJT、p型PERC、n型 PERC、Bifacial與IBC高效率太陽電池,世 界各大研究單位皆有利用銅電鍍技術做為 其高效率電池之電極的案例。雖然上述的 銅電鍍技術關鍵各有研究單位或廠商提出 討論與其解決方案,呈現百家爭鳴之態, 但目前都仍僅於實驗室或試量產階段。未 來欲付諸商業化量產,以銅電極取代銀電 極為下一世代電極技術,尚需再努力。

誌 謝

本文感謝經濟部能源局計畫支持。



參考文獻

- 1. The London Bullion Market Association, http:// www.lbma.org.uk/about-us
- 2. The London Metal Exchange, http://www.lme.com/
- 3. SEMI 2014 International Technology Roadmap for Photovoltaic(ITRPV)
- A. A. Istratov and E. R. Weber, "Physics of copper in silicon," Journal of The Electrochemical Society, vol. 149, pp. G21-G30, 2002.
- J. Bartsch, A. Mondon, M. Kamp, A. Kraft, M. Wendling, M. Mehling, et al., "Progress with multistep metallization processes featuring copper as conducting layer at Fraunhofer ISE," Proceedings of 27th EUPVSEC, 2012.
- G. Stock, D. Bollmann, R. Buchner, G. Neumayer, and K. Haberger, "Ultra-flat pn junctions formed by solid source laser doping," Applied Surface Science, vol. 46, pp. 348-351, 1990.
- D. Kray, A. Fell, S. Hopman, K. Mayer, G. Willeke, and S. Glunz, "Laser chemical processing (LCP) a versatile tool for microstructuring applications," Applied Physics A, vol. 93, pp. 99-103, 2008.
- S. Hopman, A. Fell, K. Mayer, C. Fleischmann, K. Drew, D. Kray, et al., "Study on laser parameters for silicon solar cells with LCP selective emitters," Proceedings of 24th EUPVSEC, 2009.
- A. Ogane, K. Hirata, K. Horiuchi, Y. Nishihara, Y. Takahashi, A. Kitiyanan, et al., "Laser-doping technique using ultraviolet laser for shallow doping in crystalline silicon solar cell fabrication," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 48, p. 071201, 2009.
- F. Deng, R. A. Johnson, P. M. Asbeck, S. S. Lau, W. B. Dubbelday, T. Hsiao, et al., "Salicidation process using NiSi and its device application," Journal of Applied Physics, vol. 81, pp. 8047-8051, 1997.
- D. Kim, E. Lee, J. Kim, and S. Lee, "Low-cost contact formation of high-efficiency crystalline silicon solar cells by plating," Journal of the Korean Physical Society, vol. 46, pp. 1208-1212, 2005.
- Bing-Cyun Chen, Li-Yu Li et al., "The study of Rapid Thermal Process (RTP) annealing for plated Ni/Cu contact silicon solar cells," PVSEC-22, Hangzhou, China (2012)
- L. Tous, M. Recaman Payo, M. Ngamo, J. L. Hernandez, J. Poortmans, and R. P. Mertens, "Evaluating contact resistance using epitaxially grown phosphorous emitters," Proceedings of 26th EUPVSEC,

2011.

- 14. A. Mondon, M. Jawaid, J. Bartsch, M. Glatthaar, and S. Glunz, "Microstructure analysis of the interface situation and adhesion of thermally formed nickel silicide for plated nickel–copper contacts on silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 117, pp. 209-213, 2013.
- E. J. O'Sullivan, A. G. Schrott, M. Paunovic, C. J. Sambucetti, J. R. Marino, P. J. Bailey, et al., "Electrolessly deposited diffusion barriers for microelectronics," IBM journal of research and development, vol. 42, pp. 607-620, 1998.
- 16. S. Eager, N. Mason, T. Bruton, J. Sherborne, and R. Russell, "Environmentally friendly processes in the manufacture of Saturn solar cells," in Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, 2002, pp. 62-65.
- Y.-H. Su, W.-Y. Ma, T.-N. Yang, and S.-M. Lan, "An investigation of the mechanisms of light-induced nickel plating on P-type silicon substrates," Int. J. Electrochem. Sci, vol. 7, pp. 10711-10721, 2012.
- 18. Abner Brenner, Riddell Grace E. Nickel plating by chemical reduction. U.S. Patent 2532283, 1950.
- 19. Durkee LF. Methods of plating by means of light, US Patent 4144139, 1979.
- A. Lennon, Y. Yao, and S. Wenham, "Evolution of metal plating for silicon solar cell metallisation," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, pp. 1454-1468, 2013.
- 21. A. Mette, C. Schetter, D. Wissen, S. Lust, S. Glunz, and G. Willeke, "Increasing the efficiency of screen-printed silicon solar cells by light-induced silver plating," in Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, 2006, pp. 1056-1059.
- 22. L. Tous, R. Russell, J. Das, R. Labie, M. Ngamo, J. Horzel, et al., "Large area copper plated silicon solar cell exceeding 19.5% efficiency," Energy Procedia, vol. 21, pp. 58-65, 2012.
- 23. S. Wang, A. Lennon, B. Tjahjono, L. Mai, B. Vogl, and S. Wenham, "Overcoming over-plating problems for PECVD SiN< sub> x</sub> passivated laser doped p-type multi-crystalline silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 99, pp. 226-234, 2012.
- S. Braun, A. Zuschlag, B. Raabe, and G. Hahn, "The origin of background plating," Energy Procedia, vol. 8, pp. 565-570, 2011.
- 25. A. Mondon, M. Jawaid, J. Bartsch, M. Glatthaar,



and S. Glunz, "Microstructure analysis of the interface situation and adhesion of thermally formed nickel silicide for plated nickel–copper contacts on silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 117, pp. 209-213, 2013.

- 26. L.-Y. Li, B.-C. Chen, S.-P. Hsu, C.-H. Du, Y.-Y. Wang, "The Effect of Emitter Profiles for Plated Ni/ Cu Silicon Solar Cells," Proceedings of 28th EU-PVSEC, 2013.
- 27. L. Tous, M. Aleman, R. Russell, E. Cornagliotti, P. Choulat, A. Uruena, et al., "Evaluation of advanced p-PERL and n-PERT large area silicon solar cells with 20.5% energy conversion efficiencies," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014.
- N. bay, J. Horzel, M. Passig, M. Sieber, J. Burschik, H. Kühnlein, J. Bartsch, et al., "Reliable contact formation for industrial solar cells by laser ablation and Ni/Cu plating," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- 29. J. Horzel, N. Bay, M. Passig, M. Sieber, J. Burschik, H. Kühnlein, A. Brand, A. Letize, et al., "Low cost metallization based on Ni/Cu plating enabling high efficiency industrial solar cells," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- 30. J.L. Hernández, D. Adachi, D. Schroos, N. Valckx, N. Menou, T. Uto, M. Hino et al., "High Efficiency Copper Electroplated Heterojunction Solar Cells and Modules – The Path towards 25% Cell Efficiency," Proceeding of 28th EUPVSEC, 2013.
- 31. J. Hermans, P. Papet, K. Pacheco, W.J.M. Brok, B. Strahm, J. Rochat, T. Söderström, Y. Yao, "Advanced Metallization Concepts by Inkjet Printing," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- 32. L. Tous, R. Russell, J. Beckers, J. Bertens, E. Cornagliotti, P. Choulat, J. John, et al., "A Simple Copper Based Plating Process Resulting in Efficiencies above 20.5% Using Pilot Processing Equipment," Proceedings of 28th EUPVSEC, 2013.
- http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/imecnpert-solar-cell.html
- 34. M. Graf, J. Nekarda, D. Eberlein, N. Woehrle, R. Preu, R. Böhme, T. Große, "Progress in Laser-Based Foil Metallization for Industrial PERC Solar Cells," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- J. Bartsch, M. Kamp, D. Hartleb, C. Wittich, A. Mondon, B. Steinhauser, et al., "21.8% Efficient

n-type Solar Cells with Industrially Feasible Plated Metallization," Energy Procedia, vol. 55, pp. 400-409, 2014.

- 36. D. Kyeong, S.-H. Cho, J.-K. Lim, K. Lee, M.-I. Hwang, W.J. Lee, E.C. Cho, "Approaching 20%-Efficient Selective-Emitter Solar Cells with Copper Front Contacts on Industrial 156 mm Cz Si Wafers," Proceedings of 27th EUPVSEC, 2012.
- 37. M.-S. Kim, D.-H. Kyeong, K. Lee, W.-J. Lee, E.-C. Cho, "Copper Metallization of Silicon PERL Solar Cells: Module Assembly by Bonding Ribbon Wires with Conductive Film," Proceedings of 29th EU-PVSEC, 2014.
- 38. B. Hallam, S. Wenham, A. Sugianto, L. Mai, C. M. Chong, M. Edwards, et al., "Record Large-Area p-Type CZ Production Cell Efficiency of 19.3% Based on LDSE Technology," Photovoltaics, IEEE Journal of, vol. 1, pp. 43-48, 2011.
- X. Wang, V. Allen, V. Vais, Y. Zhao, B. Tjahjono, Y. Yao, et al., "Laser-doped metal-plated bifacial silicon solar cells," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 131, pp. 37-45, 2014.
- 40. N. Guillevin, A. Gutjahr, L.J. Geerligs, J. Anker, E.E. Bende, I.J. Bennett, M. Koppes, et al.," High Efficiency n-Type Metal-Wrap-Through Cells and Modules Using Industrial Processes," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- G.J.M. Janssen, M. Koppes, Y. Komatsu, J. Anker, J. Liu, A. Gutjahr, A.A. Mewe, et al., "Front Side Improvements for n-Pasha Solar Cells," Proceedings of 29th EUPVSEC, 2014.
- 42. M. Yoshida, H. Tokuhisa, U. Itoh, T. Kamata, I. Sumita, and S. Sekine, "Novel Low-Temperature-Sintering Type Cu-Alloy Pastes for Silicon Solar Cells," Energy Procedia, vol. 21, pp. 66-74, 2012.
- 43. S. Sekine, R. Kimura, K. Okada, H. Shindo, T. Ooi, U. Itoh, et al., "New Cu paste with high bonding strength—Nano composite alloy particles synthesized by nanomized method," in Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th, 2014, pp. 2524-2527.
- Junichi Koike, "Screen-Printable Cu Paste with Low Line Resistivity and Narrow Line Width," 6th Int'l Photovoltaic Power Generation Expo PV EXPO, 2013.
- 45. 龍健華、杜政勳、林福銘,選擇性射極矽晶太 陽電池技術介紹,工業材料雜誌333期。