



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
ELETTRONICA



CARATTERIZZAZIONE DEI MECCANISMI DI CONDUZIONE E AFFIDABILITÀ
IN CELLE SOLARI

METAL WRAP THROUGH

RELATORE: *Gaudenzio Meneghesso*

LAUREANDO: *Alessandro Momolo*

Indice

1	Le Celle Solari ed il loro Principio di Funzionamento	4
1.1	Struttura Interna e Circuito Equivalente	7
1.1.1	Principio di Funzionamento	7
1.1.2	Circuito elettrico equivalente	12
1.2	Cenni sulle Tecniche di Fabbricazione	15
1.2.1	Tecniche di Crescita del Lingotto (di Silicio)	15
1.2.2	Sagomatura e Affettatura (Shaping and Wafering)	16
1.2.3	Incisione e Testurizzazione (Etching and Texturing)	16
1.2.4	Diffusione e Isolamento dei Bordi della Giunzione (Diffusion and Edge Junction Isolation)	17
1.2.5	Contattatura e Cottura (Contact Screen and Firing)	18
1.2.6	Rivestimento Anti-Riflesso (Antireflection Coating)	18
1.2.7	Interconnessione e Assemblaggio dei Moduli	18
1.3	Ricerca di Nuove Tipologie di Celle Solari	19
2	Celle Solari MWT: Modello Equivalente e Processi di Fabbricazione	21
2.1	Processi di Fabbricazione	22
2.1.1	Laser-Fired Contact (LFC)	23
2.2	Modello a Due Diodi per le Celle Solari al Silicio	25
2.2.1	Procedura di fitting per celle ad alta R_{SH}	27
2.2.2	Procedura di fitting per celle a bassa R_{SH}	29
2.3	Misure Effettuate sulle Celle MWT a Disposizione	33
2.3.1	Misure a 2 Terminali e a 4 Terminali con Keithley 2651A	35
2.3.2	Caratteristiche I-V con LOANA	37
2.3.3	Termografie e Step-Stress	40
2.4	Problematiche Incontrate	43

3	Risultati Ottenuti e Obiettivi Futuri	45
3.1	Misure a 2 Terminali e Caratteristiche I-V 4 Terminali . . .	45
3.2	Step Stress in Polarizzazione Inversa	50
3.2.1	Cella 8: Implanted, Drill Before Implant, SP on Back, No Edge Isolation	50
3.2.2	Cella 14: Diffused, Drill Before Diffusion, SP on Back, Edge Isolation	64
3.3	Modelli Matlab per le Celle Solari MWT	71
3.4	Obiettivi Futuri	75
4	Ringraziamenti	76

1 Le Celle Solari ed il loro Principio di Funzionamento

Le celle solari, o celle fotovoltaiche, sono dispositivi in grado di generare potenza elettrica grazie all'assorbimento di radiazione luminosa, come ad esempio quella offerta dal sole. Esse sono l'elemento costitutivo dei moduli fotovoltaici, nei quali singole celle vengono poste in una specie di matrice per sfruttare al massimo la superficie del modulo stesso.

Il principio sul quale si basano le celle solari è l'effetto *fotovoltaico* [1]: letteralmente, l'assorbimento di fotoni per creare un ugual numero di cariche positive e negative che possono poi essere separate per sviluppare una fototensione e una fotocorrente, in modo da ottenere una potenza elettrica da consegnare ad un carico esterno. Tale effetto venne riscontrato la prima volta nel 1839 da Becquerel che ha notato una fototensione fra elettrodi di $AgCl$ e Pt immersi in un'elettrolita. Il primo sistema a stato solido conosciuto che ha mostrato lo stesso effetto era basato sul selenio. Lavori successivi, negli anni '30 su tale materiale e su strutture $Cu - Cu_2O$ hanno portato alla realizzazione degli esposimetri per la fotografia, ma allora era stato dato poco credito all'idea di utilizzare l'effetto fotovoltaico per produrre più di una minuscola quantità di potenza. Solo nel 1954, quando l'effetto fotovoltaico è stato dimostrato essere presente anche nel silicio, c'è stata la reale consapevolezza che tale effetto era in grado di fornire sufficiente energia per applicazioni spaziali, inizialmente, e per l'uso sulla terra, successivamente.

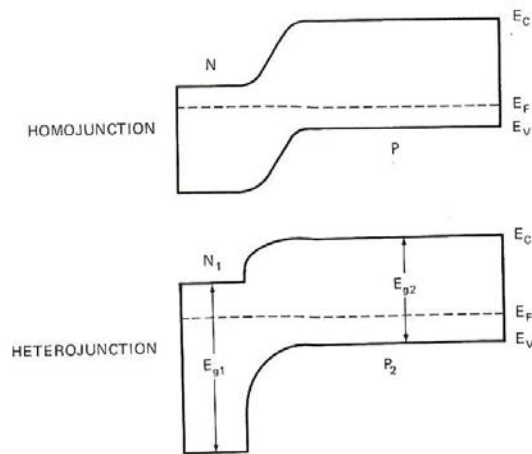


Figura 1: Diagramma a bande per omogiunzioni ed eterogiunzioni

I materiali migliori da cui ricavare le celle solari sono i semiconduttori solidi, sui quali è possibile formare una disomogeneità elettrostatica per essere in grado di separare gli elettroni e le lacune fotogenerate.

Sono possibili varie strutture, come omogiunzioni e eterogiunzioni (Figura 1); esse sono fabbricate in vari modi, come ad esempio diffusione termica, impiantazione ionica e crescita o deposizione epitassiale. Con la creazione di una giunzione, che sia all'interno o sulla superficie del semiconduttore, si forma una struttura rettificante e una fotocorrente può fluire nel diodo equivalente; l'assorbimento di fotoni avviene nelle immediate vicinanze della giunzione stessa, a circa una o due lunghezze di diffusione dei portatori minoritari. La creazione di una coppia elettrone-lacuna ad una distanza maggiore dalla giunzione è probabile che risulti in una ricombinazione all'interno del semiconduttore, e quindi abbassa notevolmente la possibilità che le cariche vengano separate dal campo elettrico creatosi alla giunzione stessa. La posizione per l'ottimo assorbimento del fotone in una cella solare è descritto dal fattore α , il coefficiente di assorbimento del materiale per l'appunto.

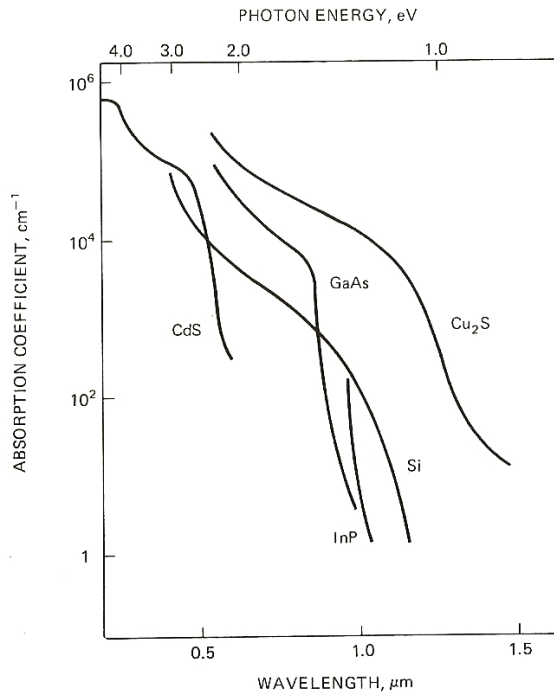


Figura 2: Coefficienti di assorbimento per materiali differenti

Il suo valore dipende dalla struttura fisica del materiale, dalla densità di stati nelle bande di valenza e di conduzione, nella natura diretta o indiretta

del *bandgap* e dalla lunghezza d'onda del fotone incidente. In figura 2 sono mostrati alcuni valori di α per i semiconduttori più comunemente utilizzati attualmente; si può notare come ad esempio nel silicio, che ha un *bandgap* indiretto, il cambiamento graduale del coefficiente α significa che l'assorbimento del fotone avviene dalla prima superficie fino a centinaia di μm di profondità nel materiale.

Le più diffuse celle solari attualmente in commercio sono in materiale cristallino, solitamente silicio, e in base alla purezza del semiconduttore forniscono rendimenti differenti, dove con rendimento si intende la percentuale di energia assorbita e trasformata rispetto a tutta l'energia incidente; si passa da valori di efficienza di circa 5-6% con celle in silicio amorfo, a circa 12-14% con celle in silicio cristallino, fino a picchi di 20% con silicio monocristallino [5]. Queste prestazioni variano in base a vari fattori, come ad esempio l'intensità luminosa incidente, la temperatura di funzionamento, l'angolazione con la quale la cella viene illuminata o la durata di vita della cella, per citarne alcuni.

Gli ambiti dove questi dispositivi possono essere utilizzati sono molteplici: dai piccoli dispositivi quali calcolatrici, orologi (silicio amorfo, basso costo) dove il modulo fotovoltaico è in grado di alimentarli autonomamente, fino ad arrivare a dispositivi più grandi, efficienti e costosi, quali pannelli fotovoltaici per case e industrie, dove invece i moduli si affiancano alla rete elettrica nell'alimentazione.

1.1 Struttura Interna e Circuito Equivalente

La Figura 3 illustra le caratteristiche interne di una cella fotovoltaica. Tale struttura è simile ad una semplice giunzione PN, ma vi sono importanti differenze. Tipicamente una regione sottile di tipo n fortemente drogata è posta sopra ad una più ampia regione p debolmente drogata; nella struttura di una cella si cerca di evitare la formazione di regioni intrinseche al fine di evitare la resistenza serie equivalente della cella stessa.

1.1.1 Principio di Funzionamento

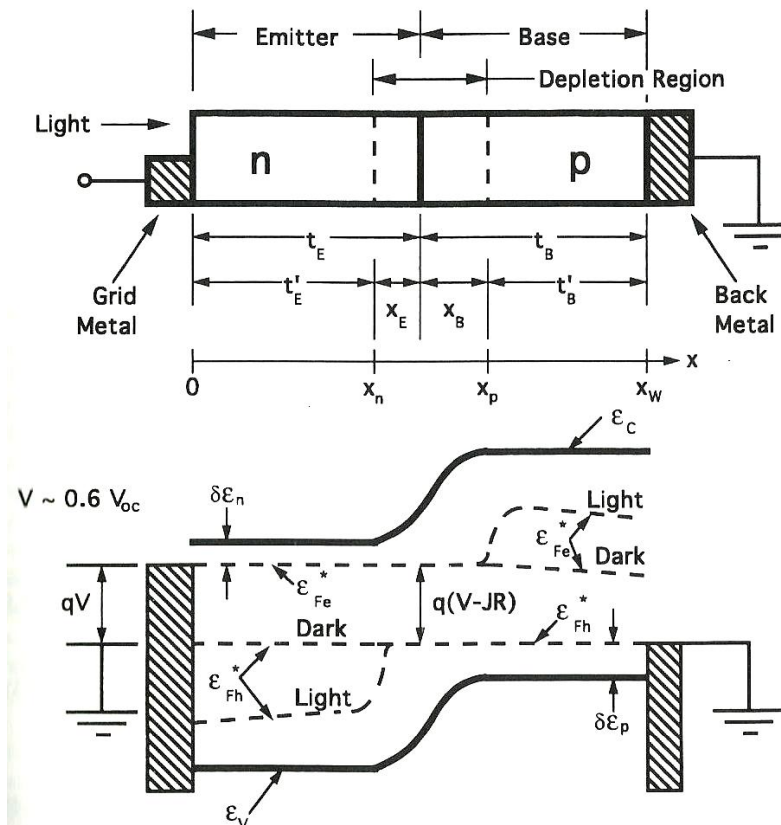


Figura 3: Struttura di una cella solare

Una tipica configurazione [2] per una cella solare è mostrata schematicamente in figura 3. Questa è una giunzione n/p standard, un diodo rettificante con un contatto metallico che copre parzialmente l'emettitore, per permettere alla luce di entrare. Un dispositivo n cresciuto su substrato p è

mostrato con una regione di svuotamento elettrostatica che penetra per una profondità x_E nell'emettitore spesso t_E ed anche per x_B nella base spessa t_B . L'assorbimento di luce genera un ugual numero di coppie elettrone-lacuna di non equilibrio, in concentrazione molto superiore rispetto ai portatori minoritari, ma inferiore ai portatori maggioritari in condizioni di equilibrio. Sono proprio questi portatori di non equilibrio e il loro grande scambio di energia potenziale che trasforma l'energia assorbita dai fotoni incidenti in una tensione e quindi una corrente DC che attraverso i contatti metallici può essere distribuita e rilasciata ad un carico elettrico esterno. Fuori dalla regione di svuotamento non c'è carica netta, quindi ogni scambio di energia fra elettroni e lacune in questa zona non può essere dovuta ad accumuli di carica elettrostatica. La sfida è quella di convertire i portatori minoritari di non equilibrio in portatori maggioritari con la minor perdita della loro energia potenziale aggiunta possibile: sono infatti i portatori maggioritari quelli che in ultima analisi fluiscono attraverso i due contatti metallici verso il circuito esterno. Tuttavia, il trasporto di portatori maggioritari è semplicemente descritto dalla lineare, legge di Ohm, relazione corrente-tensione, come una singola resistenza serie. La fisica più importante è contenuta nella relazione non lineare che descrive il trasporto dei portatori minoritari, dove gli effetti di gradienti di concentrazione sono particolarmente evidenti.

Si consideri una particella che si muove attraverso un gradiente di concentrazione in un materiale ospite; consideriamo il più semplice caso unidimensionale di conduzione di elettroni con concentrazione $n(x)$ e con un modello di cammino a dispersione casuale. Consideriamo due punti x_1 e x_2 separati dal cammino libero medio tra gli eventi di scattering $\Lambda = x_2 - x_1$ e un volume $V_\Lambda = \Lambda A$, dove A è la sezione dell'area in questione.

Poiché la velocità è casuale, solo la metà di questi elettroni è in movimento da x_1 verso x_2 ad una velocità media v_x . L'altra metà si allontana dall'intervallo $x_2 - x_1$. La forza che questi elettroni (che si spostano tra x_1 e x_2) esercitano sul reticolo del materiale ospite è uguale al numero in questione ($nV_\Lambda/2$), la loro variazione di momento dovuta allo scattering ($2p_x$), e la velocità con cui sono sparsi ($1 / \tau'$), dove τ' è il tempo libero medio tra eventi di scattering. Questo rapporto fra tempo e variazione momento e forza risulta:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta p}{\Delta t} \Big|_L &= \frac{n(x_2)}{2} 2p_x(x_2) \frac{V_\Lambda}{\tau'(x_2)} - \frac{n(x_1)}{2} 2p_x(x_1) \frac{V_\Lambda}{\tau'(x_1)} \\ &= n(x_2)p_x(x_2) \frac{v_x(x_2)}{\Lambda} V_\Lambda - n(x_1)p_x(x_1) \frac{v_x(x_1)}{\Lambda} V_\Lambda \end{aligned} \quad (1)$$

siccome $\tau' = \Lambda/v_x$, dove Δt è l'intervallo del differenziale di tempo e L sottoscritto identifica la forza sul reticolo. La velocità media al quadrato v^2 è equivalente a tre volte il quadrato della velocità in una singola direzione (ad esempio, $v^2 = 3v_x^2$), e p_x equivale a $m_{de}v_x$, dove m_{ve} è l'effettiva massa per gli elettroni di conduzione. Anche l'energia cinetica media $m_{de}v^2/2$ equivale a $2kT/2$, dove k è la costante di Boltzmann (Feynman et al., 1963). Quest'ultimo combinato fornisce $p_x v_x = kT$ e semplifica l'equazione 1 in

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \Big|_L = k \left[\frac{n(x_2)T(x_2) - n(x_1)T(x_1)}{x_2 - x_1} \right] V_\Lambda \quad (2)$$

Prendendo la parte negativa di questa formula e dividendola per il numero di elettroni, nV_Λ , essa dà la forza media di un elettrone come $-(kT/n)d/dx [n(x)]$ con il limite di essere in un piccolo intervallo $x_2 - x_1$ e che vi sia temperatura costante T . L'integrazione di questa forza a gradiente di concentrazione sulla distanza fornisce una variazione di energia potenziale che è altrettanto reale quanto quella ottenuta integrando la forza del campo elettrico su distanza. Nelle celle solari l'energia di Fermi ϵ_F è interpretato in maniera consistente come energia potenziale (Partain e Sheldon, 1980), e così verrà trattata in questa breve discussione. Un gradiente nell'energia potenziale (o nell'energia di Fermi) fornisce una forza che può essere moltiplicata per la mobilità μ per ottenere la velocità di trasporto per le particelle mobili. Quando ciò è combinato con la ben conosciuta relazione fra le concentrazioni di elettroni e lacune e l'energia di Fermi (Kittel, 1969; Sze, 1981),

$$n = N_c e^{-(\epsilon_C - \epsilon_F)/kT} \quad (3)$$

e

$$p = N_v e^{-(\epsilon_F - \epsilon_V)/kT} \quad (4)$$

le attuali equazioni di trasporto sono ottenute per elettroni e lacune caricate (Sze, 1981; Shockley 1976), con un termine di forza dovuto al campo elettrico oltre al termine forza per il gradiente di concentrazione di cui sopra. Quindi ϵ_C ed ϵ_V sono i bordi delle bande di conduzione e di valenza illustrati in figura 3 e $N_c = 2M_c(2\pi m_{de}kT/h^2)^{3/2}$ ed $N_v = 2(2\pi m_{dh}kT/h^2)^{3/2}$. Le effettive masse per le densità di stati per elettroni e lacune sono m_{de} e m_{dh} rispettivamente, h è la costante di Planck ed M_c è il numero dei minimi equivalenti al bordo banda di conduzione.

I livelli di energia tracciati nella parte inferiore della figura 3 sono le energie degli elettroni caricati negativamente che aumentano quando i livelli si

spostano verso l'alto. Al contrario, le energie delle lacune caricate positivamente aumentano man mano che i livelli scendono. Questo comportamento reciproco era previsto dal momento che stiamo parlando di particelle caricate in maniera opposta all'interno di un campo elettrostatico. Tuttavia, l'equazione 3 mostra che anche e_F aumenta al crescere della concentrazione di elettroni n . Se la concentrazione di elettroni fosse ottenuta portando dentro un elettrone alla volta, ci sarebbe una forza per gradiente di concentrazione crescente che si oppone ad ogni elettrone aggiuntivo, in modo che la sua energia potenziale media e_F sarebbe più elevato per concentrazioni superiori. Per coerenza con l'energia elettrostatica delle lacune, l'energia potenziale delle lacune stesse aumenta muovendo verso il basso il loro livello di concentrazione, come specificato nell'equazione 4. Le energie potenziali di elettroni e lacune sono di fatto differenti: comunque tali energie potenziali sono sempre incerte e legate ad una costante di integrazione. È convenzione scegliere la differenza tra queste costanti di integrazione in modo che i valori elettrone e la lacuna si allineino all'equilibrio in figura 3 nella parte dei diagrammi a bande. Questo definisce un punto di riferimento comune molto utile che contraddistingue l'energia potenziale del livello di Fermi da una qualsiasi altra energia potenziale. Così, quando ci sono pari concentrazioni di elettroni e lacune in un semiconduttore in equilibrio intrinseco e non drogato, il livello di Fermi è quasi a metà strada tra la e_C ed e_V . Con una energia di Fermi costante all'equilibrio non c'è motivo per i portatori di avere movimenti netti o variazioni di concentrazione; solo in situazioni di non equilibrio la differenza di energia potenziale fra elettroni e lacune diventa evidente, ed il loro comportamento va spiegato introducendo il concetto dei "quasi-livelli di Fermi", e_{Fe} ed e_{Fh} rispettivamente per elettroni e lacune. Dal momento che essi si riferiscono ad un comune punto di riferimento e_F , la loro separazione è in realtà una misura della differenza di energia potenziale termodinamica che porta l'elettrone e la lacuna di non equilibrio a ricombinarsi se sono nella stessa posizione, o spostarsi l'uno verso l'altro se si trovano in posizioni separate.

Con i massicci aumenti relativi delle concentrazioni di portatori minoritari dovuto all'assorbimento della luce, il quasi-livello di Fermi delle lacune minoritarie e_{Fh} si divide da quello degli elettroni maggioritari e_{Fe} in corrispondenza dell'emettitore (figura 3). Una condizione limite cruciale discussa da Shockley nel suo trattato sul transistor (1976), è che la separazione fra i quasi-livelli di Fermi in entrambe le parti della zona di suotamento è pari alla tensione misurabile ai contatti esterni. Ciò è logico siccome i quasi livelli di Fermi descrivono separatamente le diverse energie potenziali di elettroni e lacune di non equilibrio. Un altro aspetto importante trattato da Shoc-

kley è che vi è un cambiamento delle quasi-energie di Fermi trascurabile lungo la zona di svuotamento se confrontata con il più grande cambiamento dei portatori minoritari della regione neutra. L'ultimo fatto comporta che qualsiasi portatore minoritario che entra in questa regione e esce dalla parte opposta perde una piccola parte dell'energia potenziale che aveva all'ingresso: quindi se un portatore minoritario la attraversa, esce come un portatore maggioritario senza aver subito sostanziali cambiamenti di energia potenziale.

Combinando l'equazione di trasporto con le equazioni di continuità (monodimensionali) e le condizioni limiti standard, e assumendo che la corrente è dominata dalla corrente di diffusione dei portatori minoritari ad ogni bordo della regione di svuotamento (Hovel, 1975, Shockley and Quisser 1961), si ottiene l'equazione standard del diodo anche per una cella solare a giunzione n/p:

$$J = J_0 \cdot \exp \left[q \left(\frac{V - JR}{kT} \right) - 1 \right] - J_L$$

o risolvendola per la tensione V :

$$V = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left[\frac{J}{J_0} + \frac{J_L}{J_0} + 1 \right] + JR$$

dove $J_0 = (J_{oh} + J_{oe})$, e $J_{oh} = q(n_i^2/N_D)v_{dh}f_h$, e $J_{oe} = q(n_i^2/N_A)v_{de}f_e$ ed infine J_L è la corrente fotogenerata.

Riassumendo ciò che è stato descritto brevemente in precedenza, la diffusione delle cariche crea una zona di svuotamento, dove si ha un campo elettrico, responsabile della separazione delle coppie elettrone-lacuna generate dall'assorbimento dei fotoni, la radiazione luminosa[1]. Gli elettroni si spostano verso la parte drogata n, le lacune in direzione opposta; mantenendo i morsetti esterni scollegati (a vuoto), i portatori di carica foto-generati creano una polarizzazione diretta ai morsetti stessi, chiamata V_{oc} (Open Circuit).

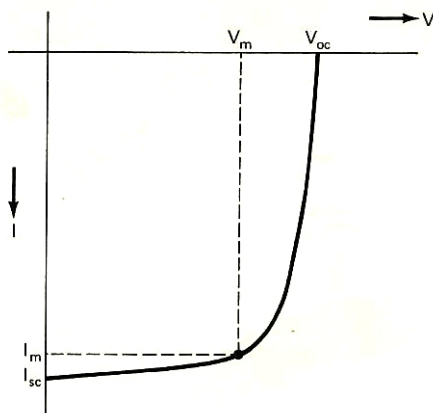


Figure 4: Caratteristica I-V tipica di una cella solare

La figura 4 mostra la caratteristica I-V generica di una cella solare, nella quale possiamo appunto osservare che V_{oc} è posta in relazione ad una corrente di uscita nulla. La corrente totale all'interno del diodo è anch'essa nulla in questo caso, in quanto la tensione foto-generata V_{oc} causa una corrente interna che risulta essere esattamente uguale e contraria alla fotocorrente. Al contrario, nel caso ideale di resistenza esterna nulla, la corrente risulta essere I_{sc} ossia la corrente di cortocircuito (Short Circuit).

Quando una resistenza esterna R_{ex} (un carico) viene connessa alla cella solare, la tensione fotogenerata forza una corrente sulla stessa, il cui andamento è riportato nella figura. Il valore di tale corrente è dato in prima approssimazione dalla differenza fra la “corrente di buio” e la fotocorrente, ma per un'analisi più dettagliata bisognerebbe tenere conto delle resistenze interne e delle conseguenti cadute di tensione che si vengono a formare.

La potenza $I \cdot V$ che viene fornita al carico dipende quindi dalla tipologia e dalle caratteristiche del carico stesso, e può essere determinata graficamente a partire dalla figura di prima. Il miglior punto di lavoro (ossia quello che sottende la maggiore area) è dato da $P_{max} = I_m \cdot V_m$. Se idealmente la curva I-V fosse un rettangolo, la massima potenza sarebbe $P_{ideale} = I_{sc} \cdot V_{oc}$; il “fattore di merito” delle attuali celle solari si definisce quindi come il rapporto fra P_{ideale} e P_{max} . Analizziamo più nel dettaglio quanto appena proposto, riferendoci ora al circuito equivalente di una cella solare

1.1.2 Circuito elettrico equivalente

Collegando un carico ai capi di una cella solare una corrente I_L può circolare attraverso il carico e sviluppare una tensione V_L sullo stesso. I valori I_L e V_L ,

oltre che dipendere dalla natura del carico, saranno correlati alla corrente fotogenerata I_P e alle proprietà del diodo.

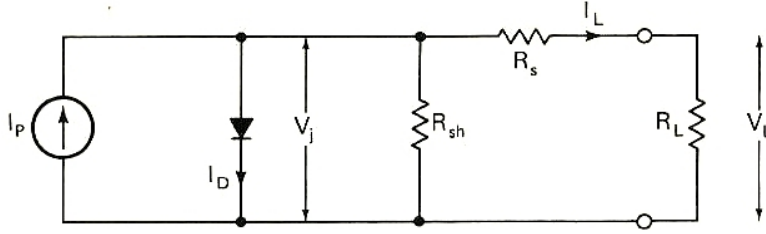


Figure 5: Circuito equivalente di una cella solare

Queste relazioni possono essere stabilite riferendosi al semplice circuito equivalente di figura 5 dove le non-idealità del diodo che comportano una corrente di perdita sono rappresentate dalla resistenza di shunt R_{sh} e la resistenza serie parassita è appunto rappresentata da R_s . Un circuito equivalente più esatto terrebbe conto della natura distribuita sia della resistenza serie che del generatore di corrente, oltre al fatto che, siccome il diodo sta operando da fotoconduttanza, le componenti di corrente che costituiscono la normale corrente di buio del diodo I_D e la corrente fotogenerata I_P non possono essere assunte operanti indipendentemente. Tuttavia per molti casi pratici, anche quello riportato nella figura precedente, il principio di sovrapposizione regge e segue che

$$I_L \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = I_p - I_D(V_j) - \frac{V_L}{R_{sh}} \quad (5)$$

dove V_j è la caduta di tensione sulla giunzione del diodo, che sia per polarizzazione ottica o elettrica. L'equazione 5 può essere risolta numericamente per accertare gli effetti di R_s e R_{sh} nella caratteristica di uscita della cella solare, ma bisogna tener conto che in generale è importante che R_s sia molto bassa (specialmente quando vengono utilizzati semiconduttori con piccoli bandgap, e cioè con alte I_p) e che R_{sh} sia tendenzialmente alta (particolarmente nei casi con grandi bandgap, e cioè con alte V_{oc}); valori tipici sono qualche decina di $m\Omega$ per R_s , e centinaia di Ω per R_{sh} . Il vero punto operativo di una cella solare con una particolare caratteristica I-V è determinato dal valore della resistenza di carico R_L , ed è chiaramente suggeribile scegliere un valore di R_L tale che la polarizzazione avvenga al massimo punto di potenza I_m, V_m (Figura). L'efficienza di conversione può essere descritta da

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_i \cdot a}$$

dove P_i è la densità di potenza solare incidente ed a è l'area della cella solare. Il rapporto fra $(I_m V_m)$ e $(I_{sc} V_{oc})$ è definito come “fattore di merito” o “fattore di riempimento” o in inglese “fill factor”, e ci permette di riscrivere la seguente espressione per l'efficienza:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_i \cdot a} \quad (6)$$

dove I_{sc} è il massimo possibile valore di fotocorrente e V_{oc} è il massimo possibile valore di fototensione. L'area attiva della cella solare sarà, nella pratica, più piccola della totale superficie frontale a poichè è necessario posizionare una griglia di materiale conduttore sopra alla cella, per acquisire la corrente generata.

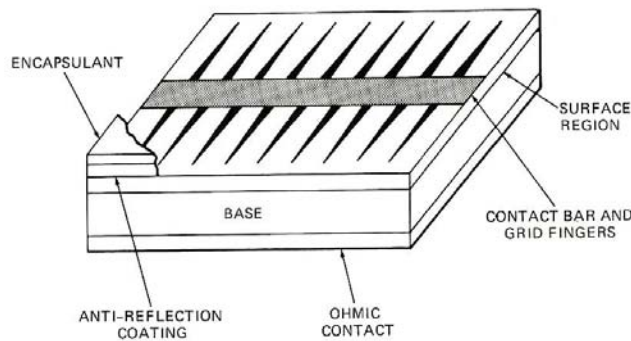


Figure 6: Sezione schematica di una cella solare

Tali griglie sono pensate e realizzate per ottimizzare il trade-off fra la riduzione della area attiva e la riduzione della resistenza serie ottenuta aumentando la copertura della cella (Figura 6). La struttura a griglia infatti migliora R_s riducendo la distanza della regione superficiale che i portatori dovrebbero attraversare prima di essere raccolti. Inoltre, sempre nella figura 6 si può notare che nelle celle solari si utilizzano degli strati antiriflesso (antireflection coating layer), al fine di migliorare l'accoppiamento fra luce e semiconduttore.

Dall'equazione 6 per determinate condizioni elettriche e per una data superficie esposta, l'efficienza di conversione è legata a tre parametri della cella, chiamati fotocorrente di cortocircuito, fototensione di circuito aperto e fattore di riempimento: tali parametri sono infatti i primi ad essere osservati al fine di capire il comportamento di una generica cella solare.

1.2 Cenni sulle Tecniche di Fabbricazione

1.2.1 Tecniche di Crescita del Lingotto (di Silicio)

Per ottenere celle al silicio dalle prestazioni ragionevoli, che siano policristalline o monocristalline, sono necessari substrati ad altissima purezza. La tecnica principale [2] per ottenere silicio cristallino è il metodo Czochralski (CZ method), mostrato in figura 7a. Polisilicio ad elevata purezza e a grana fine viene fuso in un crogiolo di quarzo; un seme viene inserito nel silicio fuso per orientare gli atomi adiacenti, che tenderanno a seguire la sua struttura, ed esso viene poi accuratamente estratto con una lenta rotazione. In questo modo dei contaminanti potrebbero comunque essere inglobati nella struttura cristallina ottenuta, come ad esempio molecole di ossigeno o di carbonio liberate dal riscaldamento di crogiolo ed ambiente circostante: tali procedure vengono infatti eseguite in appositi luoghi con atmosfere controllate, per evitare o ridurre al minimo tali imperfezioni.

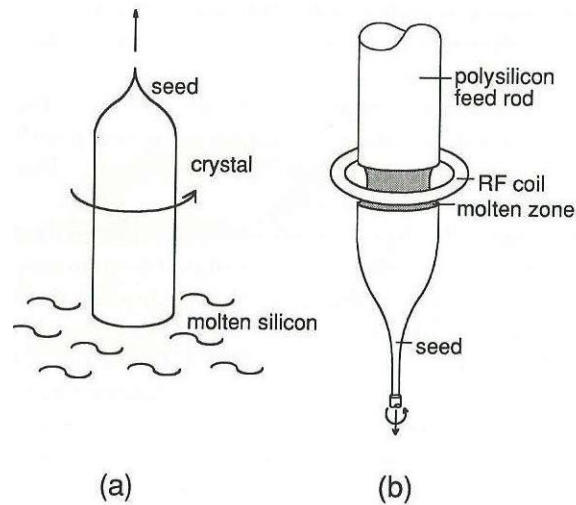


Figure 7: Metodi di crescita del lingotto di silicio

Un recente miglioramento di questa tecnica comporta l'utilizzo di un confinamento magnetico (MCZ growth): posizionando dei potenti magneti attorno al crogiolo, la convezione del fluido fuso può essere controllata, migliorando le condizioni di crescita del lingotto; inoltre si ha un maggior controllo su imperfezioni dovute a contaminanti (ossigeno o carbonio), e su difetti della struttura cristallina. D'altro canto, tuttavia, tali migliorie comportano costi crescenti per le apparecchiature di precisione coinvolte, ma puntano ad

ottenere cristalli ad altissima purezza per gruppi di ricerca o applicazioni specifiche ad elevatissimo rendimento.

Un altro metodo di produzione di lingotti di silicio viene chiamato “a zona flottante” (Float-zone, FZ), figura 7b, e consiste nell’applicare un anello di fusione a radiofrequenza attorno ad una barra policristallina. Nel metodo FZ un cristallo con struttura e composizione spuria si muove attraverso una zona ove il materiale è liquido partendo da un seme cristallino che, come nel metodo CZ, ne orienta gli atomi nella zona fusa adiacente. Questo metodo è stato usato anche per purificare i cilindri ottenuti con il metodo CZ sfruttando gli effetti di segregazione delle impurezze e di riassetamento della struttura nella zona fusa in forma di mono cristallo. Nel metodo FZ la fusione viene effettuata in vuoto o in gas inerte ed è ad impurezze zero perchè la zona di fusione non è a contatto diretto con il crogiolo, diversamente da prima. I problemi del metodo FZ sono quelli correlati al collasso della zona fusa che rimane compatta e unita al solido grazie unicamente alle forze di tensione superficiale del fuso. Questo processo incorpora molte meno impurità (ossigeno e carbonio principalmente) rispetto al metodo CZ e, come già detto, fornisce un silicio di qualità più alta.

1.2.2 Sagomatura e Affettatura (Shaping and Wafering)

Dopo la crescita, i lingotti possono essere tagliati con geometrie specifiche, con i bordi smussati o con dimensioni predefinite, oppure vengono lasciati con la loro forma circolare per essere processati come wafer rotondi. Dopo la sagomatura, i lingotti vengono segati in wafer, utilizzando una sottile lama di metallo rivestita di diamante tenuta rigidamente in tensione. Un metodo alternativo, è il taglio a filo continuo: un filo sottile è passato sopra a dei rulli formando una matrice parallela per tagliare centinaia di wafer contemporaneamente, utilizzando una pasta abrasiva. Altre tecniche utilizzano più lame parallele per lo stesso scopo o la tecnica del filo continuo con paste abrasive specifiche, derivate dal diamante (tecnica FAST, Briglio et al, 1986).

1.2.3 Incisione e Testurizzazione (Etching and Texturing)

Spesso nella lavorazione del silicio per scopi elettronici viene effettuato un trattamento a base di idrossido di sodio (o soda caustica, $NaOH$), per levigare la superficie, per prepararla alla testurizzazione o addirittura per creare delle imperfezioni a forma di piramide rovesciata per migliorare l’assorbimento dei fotoni: tale processo viene definito di “*etching*”.

Successivamente avviene la testurizzazione (texturing), che è uno dei passi di processo fra i più delicati e difficili. Alcuni fra i problemi più comuni di questo passaggio sono:

- ripetibilità del processo;
- nucleazione delle “piramidi” verso i bordi del texturing, distruggendo o rovinando le piramidi esistenti;
- mancanza di controllo sulle dimensioni delle piramidi;
- presenza di regioni non testurizzate.

Una scarsa qualità della testurizzazione può essere parzialmente compensata attraverso un post-processo con l'utilizzo di particolari additivi; una volta terminata questa fase, i wafer sono pronti per la creazione della giunzione.

1.2.4 Diffusione e Isolamento dei Bordi della Giunzione (Diffusion and Edge Junction Isolation)

Siccome i wafer sono solitamente drogati tipo p (drogaggio di boro), una giunzione di tipo n viene spesso formata nella cella; comunemente il fosforo è il responsabile di queste diffusioni, e molti sono i modi di ottenerle. In alcuni casi, un gas di fosforo è inserito direttamente nel tubo di diffusione. In altri casi, un gas di trasporto passa attraverso un tubo ed attraversa delle fonti liquide come $POCl_3$ o PBr_3 , dove si lega a molecole di fosforo “per gorgogliamento”. In alternativa, una fonte solida come P_3O_5 viene riscaldata sul crogiolo alla fine del tubo e viene poi diffusa da esso. In tutti questi casi, l'ossigeno viene trasmesso contemporaneamente al gas di fosforo attraverso il tubo per finire sui wafer, formando ossidi superficiali sul substrato. Altre tecniche includono la deposizione di composti contenenti fosforo sulla superficie della cella, tramite tecniche di spinning o per mezzo di spray, o tecniche di impiantazione ionica, più precise ma costose.

Il fosforo diffonde non solamente nella superficie desiderata del wafer, ma anche lateralmente e nella faccia opposta, in una certa misura. Ciò fornisce un cammino, *shunt path*, fra la parte anteriore e posteriore della cella; la rimozione del cammino attorno ai bordi del wafer, *edge junction isolation*, è solitamente ottenuto tramite la tecnica del “coin stacking” (letteralmente, della pila di monete). Le celle impilate sono piazzate una sopra l'altra in una camera di incisione al plasma che rimuove i bordi esposti ed affetti da tale shunt. Solitamente si decide di non rimuovere la giunzione posteriore: sarà attraverso la fase della contattatura che verrà affrontato e parzialmente risolto tale problema.

1.2.5 Contattatura e Cottura (Contact Screen and Firing)

Successivamente i contatti sono impressi sia sulla parte frontale che su quella posteriore del wafer. Per i contatti frontali, solitamente la pasta consiste di polvere d'argento combinata con il frit, un composto di vetro dal basso punto di fusione, e da altri leganti organici. Talvolta vengono aggiunti composti del fosforo per drogare più pesantemente di tipo n la parte sottostante ai contatti, e migliorare quindi la resistenza dei contatti appunto. Per le paste utilizzate nel retro della cella, spesso si utilizzano composti di alluminio per drogare le regioni della cella sottostante di tipo p. Immediatamente dopo la deposizione dei contatti, le paste vengono asciugate tramite un riscaldamento a circa 350 - 400°C.

I contatti devono essere cotti a oltre 700° per fornire loro una adeguata resistività, che resta comunque almeno tre volte peggio di quella dell'argento puro. Tale processo può influenzare molto la resistenza di contatto finale, poichè tale parametro è molto sensibile e delicato; spesso vengono usate lampade ad infrarossi per tale cottura piuttosto che i normali forni per il riscaldamento. Anche la cottura dei contatti del back può risultare cruciale per rendere neutra la giunzione del retro della cella. La fusione o comunque il riscaldamento per gradiente di calore delle zone vicino ai contatti può essere un grosso problema da fronteggiare.

1.2.6 Rivestimento Anti-Riflesso (Antireflection Coating)

Per le celle cristalline testurizzate, la riflessione superficiale è tendenzialmente bassa anche senza lo strato antiriflesso, ma anche in questo caso, comunque, è possibile ottenere un incremento di circa il 4% aggiungendo come post-processo il rivestimento in questione. Si tratta solitamente di una deposizione di TiO_2 o Si_3N_4 (nitruro di silicio), essenziale nelle celle multicristalline che non possono essere direttamente testurizzate.

1.2.7 Interconnessione e Assemblaggio dei Moduli

Dopo la prova e i test finali, le celle sono vengono interconnesse ed assemblate nella loro configurazione finale all'interno del modulo fotovoltaico. Le celle vengono poi poste in una pila costituita dallo strato superiore di vetro, uno strato EVA (Ethylene Vinyl Acetate), le celle interconnesse stesse, un altro strato di EVA e poi uno strato di supporto, solitamente fatto di Tedlar. Talvolta vengono interposti degli spazi fra gli strati, che verranno poi rimossi da una lavorazione in vuoto spinto ed ad alte temperature.

1.3 Ricerca di Nuove Tipologie di Celle Solari

Un altro importante aspetto delle celle solari riguarda il loro costo: in tutto il mondo, i produttori di celle solari stanno lavorando al fine di trovare modi innovativi per ridurre sia i costi di fabbricazione delle celle che i *costi per watt* ottenuti dalla generazione di energia fotovoltaica.

Molte sono le soluzioni utili ad ottimizzare tali parametri: esse vanno dalla ricerca di un trade-off fra purezza ed efficienza del silicio utilizzato, alla ricerca di altri semiconduttori (gallio, arsenico, cadmio, indio..) con proprietà analoghe a quelle evidenziate dal silicio (si parla in questo caso di celle o materiali III-V), fino alla realizzazione di particolari ottiche da integrare nella struttura della cella. Alcuni di questi approcci richiedono l'utilizzo di architetture rivoluzionarie, per esempio le celle MWT (“metal wrap-through”) che puntano ad aumentare l'area effettiva irraggiata della cella trasferendo tutti i contatti sul retro della stessa, o le PERC (“passivated emitter and rear cell”) che tramite una particolare passivazione del contatto di alluminio del retro della cella sono in grado di avere un rendimento più alto [4, 5]; altri metodi puntano a incrementare l'efficienza aumentando l'energia del fascio incidente, fino a valori 10, 50 o 100 volte più grandi di quella del sole; in tutti i casi, si punta ad ottenere anche piccoli aumenti della produttività, anche dell'ordine dell'1% o del 2% assoluto.

Il più alto valore di efficienza di conversione di una cella solare al silicio mai riportato risulta del 28.4% ottenuto a 200 sun (200 volte l'intensità della normale radiazione solare) [3]; i valori di efficienza di riferimento per le attuali celle MWT si posizionano attorno al 20% con intensità luminosa di 1 sun (1000 W/m^2), valori ai quali siamo riusciti ad avvicinarci anche nelle nostre misure.

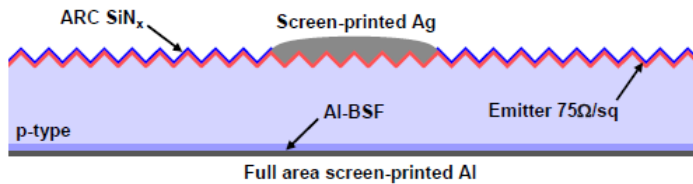


Figura 8: Sezione di una generica cella solare

Uno schema della sezione di una cella solare convenzionale è quello riportato in Figura 8: si tratta di una cella solare in silicio “all side screen printed (SP)”, ossia sottoposta a processi di stampa su ambo i suoi lati. Essa si è così diffusa sul mercato per il suo buon rapporto fra costi e risultati e per la

robusta sequenza di processo, ormai ottimizzata quasi nei minimi dettagli, e che è stata riassunta in maniera generica nella sezione precedente.

Altre tipologie di celle solari che stanno prendendo piede sono quelle chiamate IBC, ossia *Interdigitated Back Contact*, che puntano a spostare tutti i contatti della cella nella sua parte posteriore. Così facendo si riducono le parti di cella messe in ombra e si ottimizza il design dei moduli fotovoltaici, poichè si vanno a ridurre le perdite dovute agli spazi vuoti fra più celle; inoltre sono anche esteticamente più appetibili, e sebbene non sia il principale motivo di ricerca, comporta sicuramente dei benefici a livello di marketing.

Queste celle IBC possono essere raggruppate in tre grandi categorie: quelle a “giunzione posteriore”, le Emitter Wrapped Through (EWT) e le Metal Wrap Through (MWT).

Le prime hanno raggiunto efficienze di circa il 23% utilizzando un silicio di alta qualità ottenuto col metodo FZ; i metodi di fabbricazione, quali processi fotolitografici e di deposizione a vuoto spinto, sono molto costosi ed impediscono la diffusione su scala industriale delle stesse.

Per lo stesso motivo, le celle EWT sono destinate a non divenire commerciabili per via dell'utilizzo di un laser ad alta potenza e precisione durante gli step di produzione: per una cella di 5 pollici sono necessari circa 25000 fori, praticamente rendendo ingestibile una produzione su larga scala..

Le MWT invece, siccome necessitano di molti meno fori laser rispetto alle EWT, permettono di mantenere accettabili i costi per un'eventuale diffusione sui mercati, e forniscono efficienze dell'ordine di 17% - 18%, già confermate dagli istituti di competenza [4].

2 Celle Solari MWT: Modello Equivalente e Processi di Fabbricazione

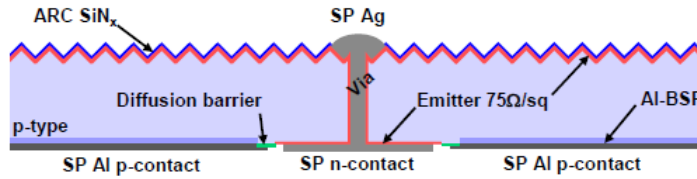


Figura 9: Sezione di una cella solare MWT

Un modo possibile di aumentare l'efficienza di conversione è quello di passare al design delle celle MWT che, rispetto alle celle convenzionali, richiedono solo un paio di passaggi in più nel processo di fabbricazione e l'utilizzo di un laser. Tramite questa tecnologia è stato dimostrato un aumento dell'efficienza di circa 0.5% assoluto ad 1 sun [3]; una sezione di tale tipologia di cella è riportata in Figura 9, dove si nota la caratteristica principale di tale modello: entrambe le polarità (contatto n e p) sono situate nella parte posteriore della cella. Come indicato, inoltre, l'isolamento elettrico fra i due contatti è ottenuto tramite una barriera per diffusione posta appunto fra i due poli opposti.

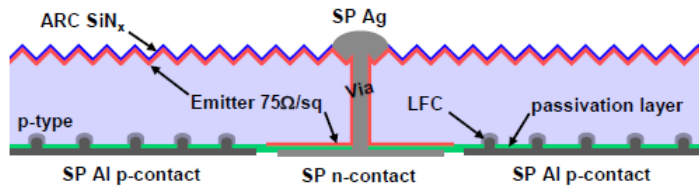


Figura 10: Sezione di una generica cella solare MWT-PERC

Un'evoluzione del design MWT sono le cosiddette MWT-PERC, che combinano le due tipologie di celle, inserendo un'ulteriore lavorazione al retro della cella per migliorarne le caratteristiche. L'implementazione della superficie posteriore passivata in combinazione con una struttura interna ottimizzata aumenta ulteriormente l'efficienza della cella, specialmente se wafer più sottili vengono utilizzati. Il guadagno delle celle PERC comparato alle celle standard è già stato considerato e confermato [5].

2.1 Processi di Fabbricazione

Come già introdotto, i processi di fabbricazione per le celle MWT non si discostano particolarmente da quelli impiegati per le normali celle solari al silicio [6]. Ovviamente, siccome su questa tipologia di celle la sperimentazione è solo agli inizi, ogni gruppo di ricerca procede secondo il modo che ritiene più opportuno e fruttuoso: anche i nostri fornitori di celle MWT erano interessati ad ottenere risposte su quale fosse il metodo con il migliore rapporto fra efficienza e costi, e quindi in questi mesi abbiamo testato varie celle fabbricate in diverse maniere.

Di seguito è fornito uno schema di principio, che comprende tutti gli step necessari alla formazione di una cella Metal Wrap Through.

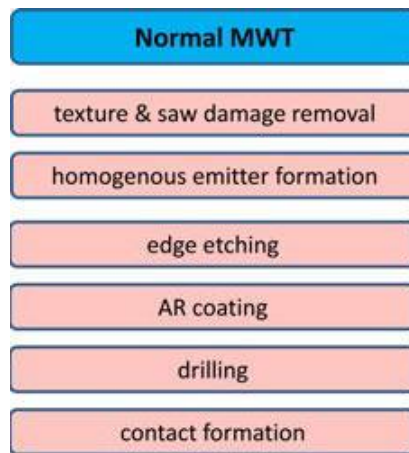


Figure 11: Processi di fabbricazione di una cella MWT

Tutti i processi necessari alla fabbricazione di tali celle possono essere eseguiti utilizzando esclusivamente strumentazioni per la produzione industriale, mantenendo di conseguenza i costi abbastanza bassi. L'unico "nuovo" passo di progetto è quello che prevede l'utilizzo del laser per forare la cella e formare il contatto fra parte superiore ed inferiore: si parla di LFC, *laser-fired contact*, e nel prossimo paragrafo verrà brevemente descritto.

Le nostre misure sono state condotte sulle seguenti tipologie di celle:

- *Implanted, Drill After Implant, SP on Back, No Edge Isolation*
- *Implanted, Drill Before Implant, SP on Back, No Edge Isolation*
- *Diffused, Drill After Diffusion, SP on Back, Edge Isolation*

- *Diffused, Drill Before Diffusion, SP on Back, Edge Isolation*
- *Diffused, Drill after diffusion, DP on back, Edge Isolation*
- *Diffused, Drill Before diffusion, DP on back, Edge Isolation*

Le principali differenze fra i campioni a nostra disposizione (quattro per ogni tipologia) riguardavano quindi il modo con cui è stata drogata la cella (se per diffusione o per impiantazione ionica), la modalità con cui è stato lavorato il retro della cella (se con uno o con due passaggi di stampa per la deposizione dei contatti), la presenza o meno dell'isolamento sui bordi della cella ed infine, il momento in cui è stato utilizzato il processo di LFC.

Come sarà possibile osservare nella sezione dei risultati ottenuti, il metodo di produzione fornisce delle caratteristiche fisiche ed elettriche alle singole celle, che si comporteranno quindi in modi diversi l'una dall'altra.

2.1.1 Laser-Fired Contact (LFC)

Questa tecnica permette di sciogliere localmente la superficie posteriore in alluminio, forare i vari strati della cella e formare una connessione fra le due facce della cella. L'utilizzo del laser per forare la struttura cristallina della cella comporta varie conseguenze [7], ma anche il solo differente collocamento di esso negli step di produzione porta a diversi risultati.

Specialmente per i wafer sottili, è vantaggioso avere uno strato di passivazione fra lo strato posteriore del wafer e l'elettrodo di alluminio. Questo layer è isolante ed è proprio questo fattore che introduce il problema di come contattare la metallizzazione con il silicio. Un metodo elegante consiste nel depositare uno strato di alluminio sopra lo strato di passivazione e poi "sparare" i contatti attraverso tale layer attraverso degli impulsi laser incidenti sull'alluminio. Il laser rimuove il layer di passivazione e contemporaneamente connette l'alluminio con il sottostante silicio per riflusso.

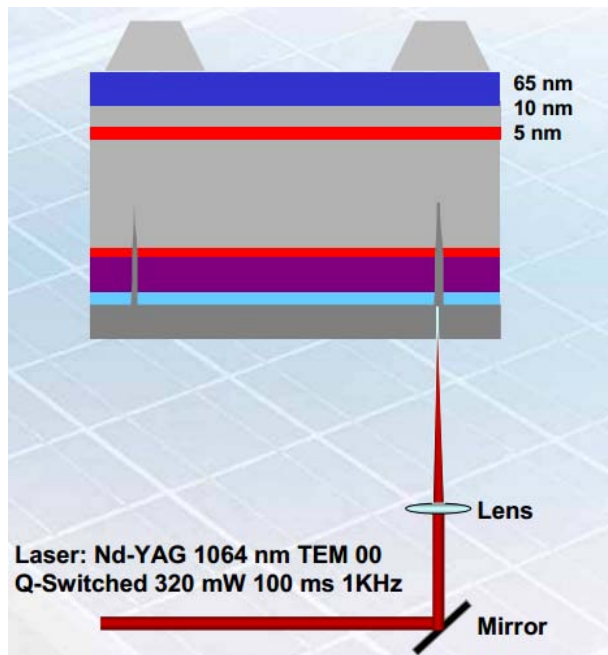


Figure 12: Immagine illustrativa del processo LFC

Il Fraunhofer Institute ha sviluppato una tecnologia che utilizza un laser IR ad $1\mu m$ per irradiare l'alluminio che viene poi a contattare il sottostante silicio: per un wafer di $125mm \times 125mm$ sono necessari 15000 connessioni; in figura è presentata invece la tecnologia utilizzata dai ricercatori di ENEA e presentata per il PV ROME Mediterranean 2010, che come si nota, utilizza anche una lente per concentrare il fascio di un laser Nd-YAG a $1064nm$.

2.2 Modello a Due Diodi per le Celle Solari al Silicio

Al fine di descrivere con una certa precisione il comportamento delle celle MWT in esame, si è deciso di utilizzare il “modello a due diodi per le celle solari al silicio”, al posto di quello più semplicistico presentato precedentemente. Tale modello utilizza appunto due diodi con differenti fattori di idealità e correnti di saturazione, per separare i due meccanismi di trasporto di corrente che entrano in gioco: la corrente di diffusione e la corrente di ricombinazione. Di seguito vengono proposti i due schemi equivalenti che vengono utilizzati nel caso di cella solare illuminata ed in condizione di buio; come si può notare l'unica differenza fra le due rappresentazioni è la presenza di un generatore di fotocorrente I_{PH} .

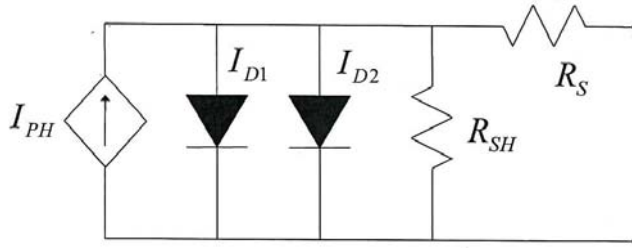


Figure 13: Circuito equivalente della cella solare illuminata

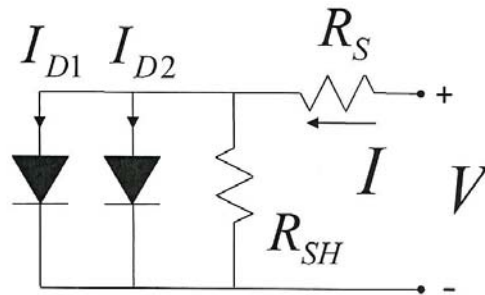


Figure 14: Circuito equivalente della cella solare al buio

$$I = I_{S1} \left(\exp \left(\frac{V - I R_S}{\eta_1 V_T} \right) - 1 \right) + I_{S2} \left(\exp \left(\frac{V - I R_S}{\eta_2 V_T} \right) - 1 \right) + \frac{V - I R_S}{R_{shunt}} \quad (7)$$

Anche in questo caso, utilizziamo la caratteristica tensione-corrente per studiare le proprietà elettriche di una generica cella solare MWT. Inoltre, basandosi sul modello equivalente alla cella in condizioni di buio (figura 14) e dalla

equazione 7, è stato utilizzato un programma in MATLAB in grado di estrapolare i valori della resistenza serie (R_s), della resistenza di shunt (R_{shunt}), dei fattori di idealità (η_1 ed η_2) e delle rispettive correnti di saturazione dei due diodi (I_{S1} e I_{S2}); di seguito è illustrato nel dettaglio il metodo di funzionamento di tale algoritmo.

Per l'estrazione dei parametri, si suddivide la curva in quattro differenti parti (figura 15): nella prima regione ($V \approx 0 - 0.15V$), la corrente di buio è dominata dalla resistenza di shunt; nella seconda regione ($V \approx 0.2 - 0.4V$) la corrente è dominata dal meccanismo di ricombinazione; nella terza regione ($V \approx 0.4 - 0.6V$) è il meccanismo di diffusione ad essere il principale. Da qui in avanti, il parametro dominante è la resistenza serie.

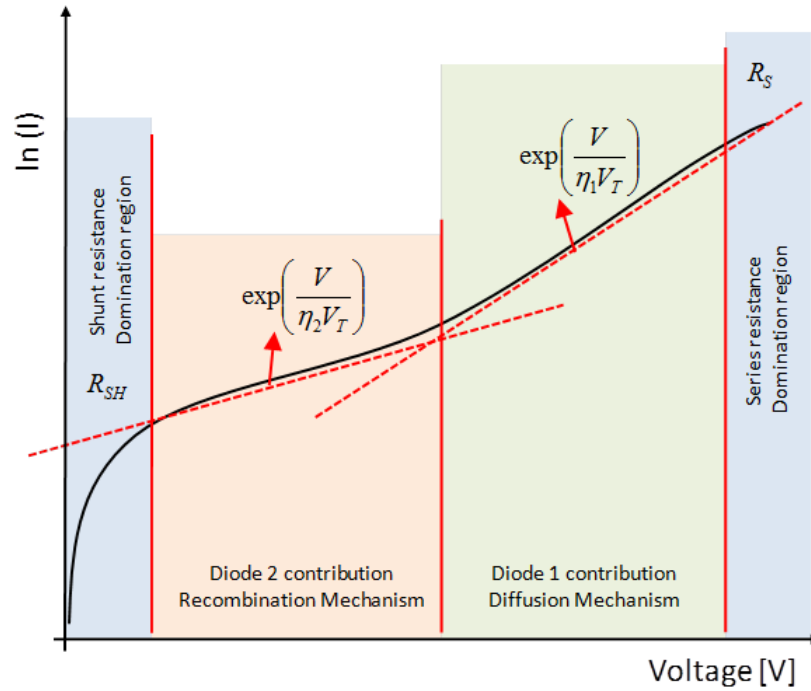


Figure 15: Grafico schematico in scala semilogaritmica di una curva I-V ottenuta al buio

Possiamo considerare che nella parte alta della caratteristica I-V, la curva può essere descritta dalla seguente relazione:

$$I = I_{S1} \left[\exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

che considera solo i contributi del diodo D_1 e della resistenza serie R_S .

Per la parte più bassa della curva, dopo aver sottratto il contributo del primo diodo, è possibile utilizzare la seguente relazione:

$$I - I_{D1} = I_{S2} \left[\exp \left(\frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \quad (9)$$

Di seguito riportiamo l'esatta procedura di estrazione dei parametri, a seconda delle caratteristiche della cella in esame.

2.2.1 Procedura di fitting per celle ad alta R_{SH}

1. Estrazione dei parametri I_{S1} , η_1 ed R_S : per $I \gg I_{S1}$ possiamo scrivere che la parte alta della curva si può rappresentare come

$$I = I_{S1} \left[\exp \left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} \right) - 1 \right] \simeq I_{S1} \exp \left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} \right)$$

$$\ln(I) = \ln(I_{S1}) + \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}$$

Considerando un punto (V_0, I_0) della curva I-V, possiamo scrivere la seguente relazione:

$$\ln(I) - \ln(I_0) = \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} - \frac{V_0 - I_0 R_S}{\eta_1 V_T}$$

$$\ln(I) - \ln(I_0) = \frac{V - V_0}{\eta_1 V_T} - \frac{R_S}{\eta_1 V_T} (I - I_0)$$

$$\frac{\ln(I) - \ln(I_0)}{(I - I_0)} = \frac{V - V_0}{I - I_0} \frac{1}{\eta_1 V_T} - \frac{R_S}{\eta_1 V_T}$$

Considerando ora

$$X = \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad Y = \frac{\ln(I) - \ln(I_0)}{I - I_0}$$

si ottiene una retta di equazione

$$Y = \frac{1}{\eta_1 V_T} X - \frac{R_S}{\eta_1 V_T} = mX + q$$

La regressione lineare di questa retta ottenuta ci fornisce i parametri cercati, ossia:

$$\eta_1 = \frac{1}{m V_T} \quad R_S = -q \eta_1 V_T$$

A questo punto, quando conosciamo R_S , la corrente di saturazione inversa (I_{S1}) è ottenuta tramite una seconda regressione lineare. Questo nuovo fit ci fornisce un nuovo valore di η_1 .

$$\ln(I) \simeq \ln(I_{S1}) + \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}$$

considerando:

$$X_1 = V - IR_S \quad e \quad Y_1 = \ln(I)$$

si ottiene una nuova retta:

$$Y_1 = \frac{1}{\eta_1 V_T} X_1 - \ln(I_{S1}) = m_1 X_1 + q_1$$

Dalla regressione lineare di questa curva possiamo ottenere i nuovi parametri η_1 e la corrente di saturazione I_{S1} :

$$\eta_1 = \frac{1}{m_1 V_T} \quad I_{S1} = \exp(q_1)$$

2. Estrazione di I_{S2} , η_2 e di R_{SH} : per estrapolare il secondo contributo esponenziale e la resistenza di shunt, definiamo

$$V_C = V - IR_S \quad I_{D1} = I_{S1} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}\right)$$

La corrente I_{D1} va sottratta dalla totale corrente e si ottiene la seguente:

$$I_R = I - I_{D1} = I_{S2} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}\right)$$

$$\ln(I_R) = \ln(I_{S2}) + \frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}$$

$$\ln(I_R) = \ln(I_{S2}) + \frac{V_C}{\eta_2 V_T}$$

Considerando ora

$$X_2 = V_C = V - IR_S \quad e \quad Y_2 = \ln(I_R)$$

si ottiene una retta

$$Y_2 = \frac{1}{\eta_2 V_T} X_2 + \ln(I_{S2}) = m_2 X_2 + q_2$$

La regressione lineare di tale retta fornisce i parametri η_2 ed I_{S2} .

$$\eta_2 = \frac{1}{m_2 V_T} \quad I_{S2} = \exp(q_2)$$

A questo punto possiamo calcolare il valore di R_{SH} con la seguente relazione che deriva direttamente dall'equazione iniziale:

$$R_{SH} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - I_{S1} \frac{1}{\eta_1 V_T} - I_{S2} \frac{1}{\eta_2 V_T} \right]^{-1}$$

Se R_{SH} è comparabile al dV/dI nella regione utilizzata per determinare I_{S2} e η_2 , allora si va ad eseguire un "fit" della curva considerando l'introduzione del valore R_{SH} e da cui è possibile ottenere i valori definitivi per I_{S2} e η_2 .

$$I'_R = I - I_{D1} - I_{RSH} = I_R - \frac{V_C}{R_{SH}} = I_{S2} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}\right)$$

$$\ln(I'_R) = \ln\left(I_R - \frac{V_C}{R_{SH}}\right) = \ln(I_{S2}) + \frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}$$

Scegliendo

$$X_3 = V_C = V - IR_S \quad e \quad Y_3 = \ln(I'_R) = \ln\left(I_R - \frac{V_C}{R_{SH}}\right)$$

si ottiene una ulteriore retta di equazione:

$$Y_3 = \frac{1}{\eta_2 V_T} X_3 + \ln(I_{S2}) = m_3 X_3 + q_3$$

La regressione lineare di quest'ultima retta ci ritorna i parametri cercati, cioè

$$\eta_2 = \frac{1}{m_3 V_T} \quad I_{S2} = \exp(q_3)$$

2.2.2 Procedura di fitting per celle a bassa R_{SH}

La procedura è simile a quella appena descritta, ma è doveroso considerare il contributo di R_{SH} dato il suo valore relativamente basso.

1. Stima di R_{SH} : il primo passo consiste nello stimare in maniera anche grossolana il valore di R_{SH} partendo dalla prima regione della curva I-V

$$R_{SH} \approx \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0}$$

2. Estrazione di I_{S1} , η_1 e di R_S : per $I \gg I_{S1}$ possiamo dire che per la parte “alta” della curva I-V vale

$$I = I_{S1} \left[\exp \left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} \right) - 1 \right] + \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \simeq I_{S1} \exp \left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} \right) + \frac{V - IR_S}{R_{SH}}$$

$$\ln \left(I - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \right) \simeq \ln(I_{S1}) + \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}$$

Considerando un punto (V_0, I_0) della curva I-V, possiamo scrivere la seguente relazione:

$$\ln \left(I - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \right) - \ln \left(I_0 - \frac{V_0 - I_0 R_S}{R_{SH}} \right) = \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T} - \frac{V_0 - I_0 R_S}{\eta_1 V_T}$$

$$\ln \left(I - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \right) - \ln \left(I_0 - \frac{V_0 - I_0 R_S}{R_{SH}} \right) = \frac{V - V_0}{\eta_1 V_T} - \frac{R_S}{\eta_1 V_T} (I - I_0)$$

$$\frac{\ln \left(I - \frac{V}{R_{SH}} \right) - \ln \left(I_0 - \frac{V_0}{R_{SH}} \right)}{I - I_0} = \frac{V - V_0}{I - I_0} \frac{1}{\eta_1 V_T} - \frac{R_S}{\eta_1 V_T}$$

Nell'ultimo passaggio il contributo di R_S è stato cancellato nella parte sinistra dell'equazione in quanto si considera il prodotto IR_S basso rispetto alla tensione V nella parte alta della curva. Considerando ora

$$X = \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad Y = \frac{\ln \left(I - \frac{V}{R_{SH}} \right) - \ln \left(I_0 - \frac{V_0}{R_{SH}} \right)}{I - I_0}$$

si ottiene una retta di equazione

$$Y = \frac{1}{\eta_1 V_T} X - \frac{R_S}{\eta_1 V_T} = mX + q$$

La regressione lineare di questa retta ottenuta ci fornisce i parametri cercati, ossia:

$$\eta_1 = \frac{1}{mV_T} \quad R_S = -q\eta_1 V_T$$

A questo punto, quando conosciamo R_S , la corrente di saturazione inversa (I_{S1}) è ottenuta tramite una seconda regressione lineare. Questo nuovo fit ci fornisce anche un nuovo valore di η_1 .

$$\ln \left(I - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \right) \simeq \ln(I_{S1}) + \frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}$$

considerando:

$$X_1 = V - IR_S \quad e \quad Y_1 = \ln\left(I - \frac{V - IR_S}{R_{SH}}\right)$$

si ottiene una nuova retta:

$$Y_1 = \frac{1}{\eta_1 V_T} X_1 - \ln(I_{S1}) = m_1 X_1 + q_1$$

Dalla regressione lineare di questa curva possiamo ottenere i nuovi parametri η_1 e la corrente di saturazione I_{S1} :

$$\eta_1 = \frac{1}{m_1 V_T} \quad I_{S1} = \exp(q_1)$$

3. Estrazione di I_{S2} , η_2 e di R_{SH} : per estrapolare il secondo contributo esponenziale e la resistenza di shunt, definiamo

$$V_C = V - IR_S \quad I_{D1} = I_{S1} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_1 V_T}\right)$$

La corrente I_{D1} va sottratta dalla totale corrente e si ottiene la seguente corrente rimanente:

$$I_R = I - I_{D1} - I_{RSH} = I - I_{D1} - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} = I_{S2} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}\right)$$

$$\ln(I_R) = \ln(I_{S2}) + \frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}$$

$$\ln(I_R) = \ln(I_{S2}) + \frac{V_C}{\eta_2 V_T}$$

Considerando ora

$$X_2 = V_C = V - IR_S \quad e \quad Y_2 = \ln(I_R)$$

si ottiene una retta

$$Y_2 = \frac{1}{\eta_2 V_T} X_2 + \ln(I_{S2}) = m_2 X_2 + q_2$$

La regressione lineare di tale retta fornisce i parametri η_2 ed I_{S2} .

$$\eta_2 = \frac{1}{m_2 V_T} \quad I_{S2} = \exp(q_2)$$

A questo punto possiamo calcolare il valore di R_{SH} con la seguente relazione che deriva direttamente dall'equazione iniziale:

$$R_{SH} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - I_{S1} \frac{1}{\eta_1 V_T} - I_{S2} \frac{1}{\eta_2 V_T} \right]^{-1}$$

Se R_{SH} è comparabile al dV/dI nella regione utilizzata per determinare I_{S2} e η_2 , allora si va ad eseguire un "fit" della curva considerando l'introduzione del valore R_{SH} e da cui è possibile ottenere i valori definitivi per I_{S2} e η_2 .

$$I'_R = I - I_{D1} - I_{RSH} = I_R - \frac{V_C}{R_{SH}} = I_{S2} \exp\left(\frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}\right)$$

$$\ln(I'_R) = \ln\left(I_R - \frac{V_C}{R_{SH}}\right) = \ln(I_{S2}) + \frac{V - IR_S}{\eta_2 V_T}$$

Scegliendo

$$X_3 = V_C = V - IR_S \quad e \quad Y_3 = \ln(I'_R) = \ln\left(I_R - \frac{V_C}{R_{SH}}\right)$$

si ottiene una ulteriore retta di equazione:

$$Y_3 = \frac{1}{\eta_2 V_T} X_3 + \ln(I_{S2}) = m_3 X_3 + q_3$$

La regressione lineare di quest'ultima retta ci ritorna i parametri cercati, cioè

$$\eta_2 = \frac{1}{m_3 V_T} \quad I_{S2} = \exp(q_3)$$

2.3 Misure Effettuate sulle Celle MWT a Disposizione

In questa sezione verranno presentate le principali attività di laboratorio da noi svolte nel campo delle MWT, ossia:

- soluzione dei problemi di conduzione e fissaggio delle celle, provando varie strutture per ottenere misure corrette, come ad esempio la contattatura manuale diretta, le tecniche a 2 e a 4 terminali, l'utilizzo di una pasta saldante conduttiva o l'uso di una pasta a base di argento a rapida asciugatura
- misura delle caratteristiche I-V, in condizione di buio e di piena illuminazione, utilizzando diversi sistemi di misura (LOANA, Keithlay 2651A)
- realizzazione di uno step-stress in polarizzazione inversa, per simulare una cella solare "in ombra" all'interno di un modulo in corretto funzionamento, utilizzando una termocamera per mostrare gli "hot spot" della cella e una degradazione della stessa in tempo reale.
- esecuzione di un *fit* parametrico dei dati ricavati dalle caratteristiche I-V, per permetterci di simulare il comportamento delle celle basandoci sul "modello a due diodi delle celle solari al silicio"

Inoltre, verranno brevemente presentati le tipologie di strumenti, di metodi e di programmi che sono stati utilizzati al fine di ottenere le misure presentate.



Figure 16: Cella solare MWT, vista frontale

Grazie alla collaborazione con la ditta Applied Materials (AMAT), abbiamo avuto la possibilità di testare e utilizzare delle celle solari MWT. Esse si presentano molto simili alle tradizionali celle solari in silicio, hanno una forma quadrata con i vertici smussati e presentano una specie di griglia conduttiva sottilissima che raggiunge la quasi totalità della cella, come si può vedere in figura 16.

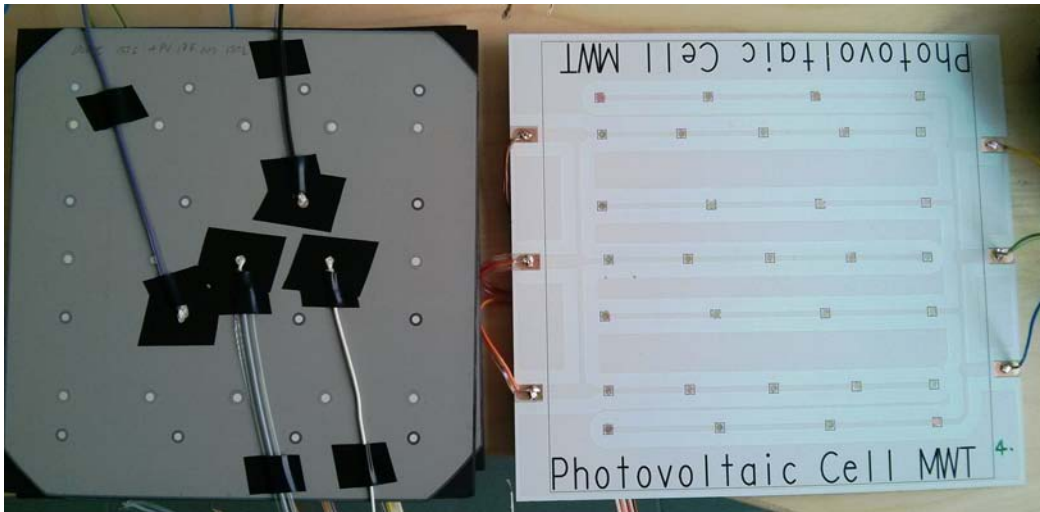


Figure 17: Cella solare MWT, vista posteriore, e supporto metallico utilizzato

Fin dal principio abbiamo utilizzato un supporto metallico, progettato appositamente, per “incollare” le celle, visto che esse sono delicatissime ed anche un piccolo movimento sbagliato potrebbe causarne la rottura (figura 17). Una volta incollate su questo supporto spesso circa $2 - 3\text{mm}$, risulta più pratico maneggiarle e spostarle per eseguire le misure richieste. Come si può vedere nell’immagine in figura 17, il supporto metallico ha un design apposito in quanto esso permette di contattare i pin presenti sul retro della cella per essere in grado di raccogliere tutta la corrente fotogenerata; per fare aderire tali punti a quelli della cella abbiamo utilizzato vari tipi di pasta conduttiva saldante. Abbiamo subito notato che anche la scelta del tipo di pasta da utilizzare era un passo cruciale per ottenere misure stabili, corrette e ripetibili, in quanto è necessario trovare un buon compromesso fra tenuta “meccanica” della colla e buona conduttività della pasta. Queste considerazioni verranno ribadite e approfondite nel capitolo finale di questa tesi.

2.3.1 Misure a 2 Terminali e a 4 Terminali con Keithley 2651A

A questo punto abbiamo deciso di inserire una serie di misure da compiere ancora prima del fissaggio sul supporto, per non alterare in alcun modo il comportamento nativo della cella e per ottenerne i primi parametri significativi.

La serie di misure che sono state inserite comprendevano misure di resistenza sia fra contatti della parte posteriore sia fra contatti della parte anteriore della cella, eseguite a due e a quattro terminali, e l'acquisizione di caratteristiche I-V contattando diversi punti della cella, sempre attraverso la tecnica dei quattro terminali.

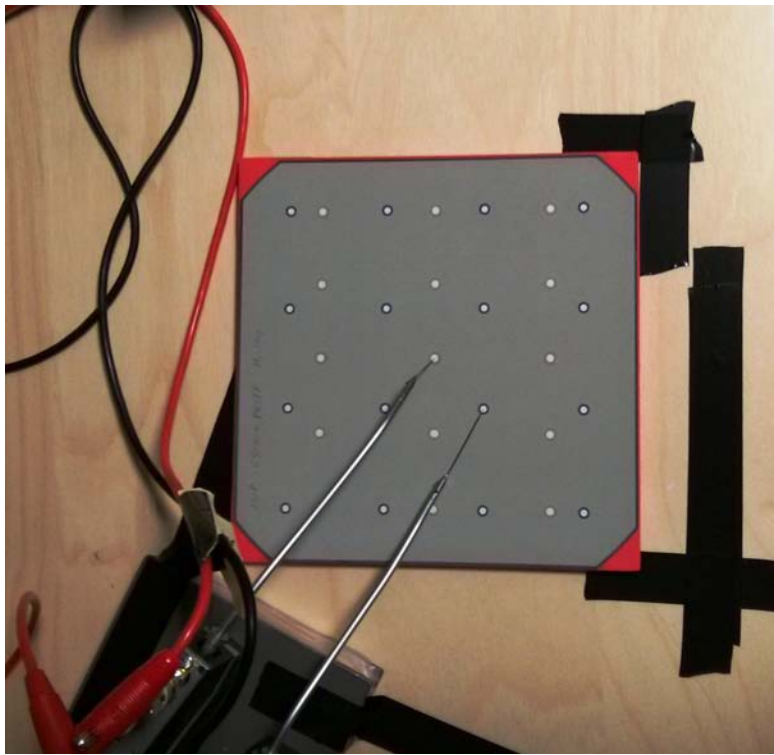


Figure 18: Immagine di una misura effettuata a due terminali

Come si può vedere in figura 18, sono state utilizzati dei puntali di precisione, in modo da poter agire in maniera molto precisa e delicata sulla cella. Inoltre per questo tipo di misure, è stato utilizzato un generatore Keithley 2651A, che è uno strumento appositamente creato per pilotare importanti carichi capacitivi, fatto che spesso accade nel campo delle celle solari; infine è stato utilizzato un programma LabView, di cui è possibile vedere la schermata in

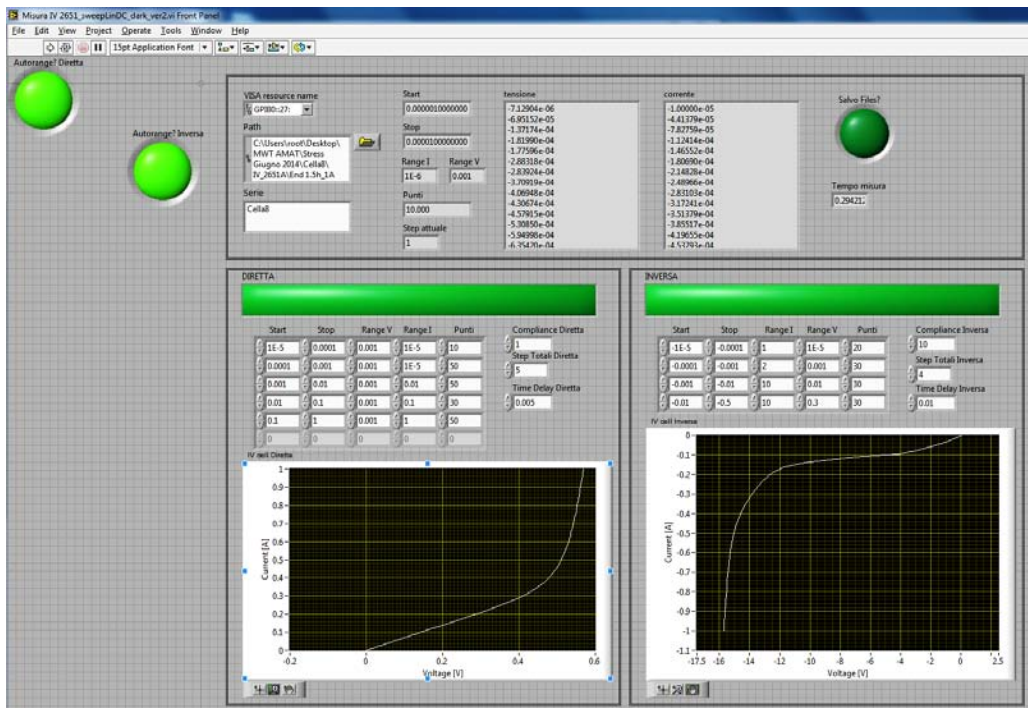


Figure 19: Screenshot della schermata del programma LabView per acquisire una caratteristica I-V

figura 19, per interfacciare il computer con il generatore e comandarlo correttamente. Utilizzando due o quattro terminali infatti, non è consigliabile raggiungere picchi di alte correnti, in quanto si potrebbe rompere o riscaldare in maniera distruttiva la cella, rendendo inutile ogni successiva misura sulla stessa. Nelle prime nostre misure abbiamo limitato la corrente ad un valore massimo di circa 1 - 1,2 A; questa limitazione è stata resa possibile dal programma LabView che, come si può notare in figura 19, funzionava forzando un determinato valore di corrente ed andando a rilevare il relativo valore di tensione (pilotaggio in corrente).

Dopo queste prime misure orientative si è passati ad un setup più preciso, utilizzando quattro e non più due puntali ad alta precisione per ottenere i dati richiesti. In questo modo è stato possibile utilizzare due di questi terminali per l'acquisizione della misura e i rimanenti due per forzare la corrente nel dispositivo; nel caso a due terminali queste due funzioni venivano sovrapposte, e nella pratica i terminali di "force" e "sense" venivano cortocircuitati. Ciò ha permesso di ottenere misure più precise ed ha evidenziato dei comportamenti particolari e singolari delle celle, che verranno trattati successivamente. In figura 20 è possibile osservare il metodo per contattare

le celle nella pratica, mentre dal punto di vista del software abbiamo continuato ad utilizzare il software raffigurato in precedenza (figura 19).

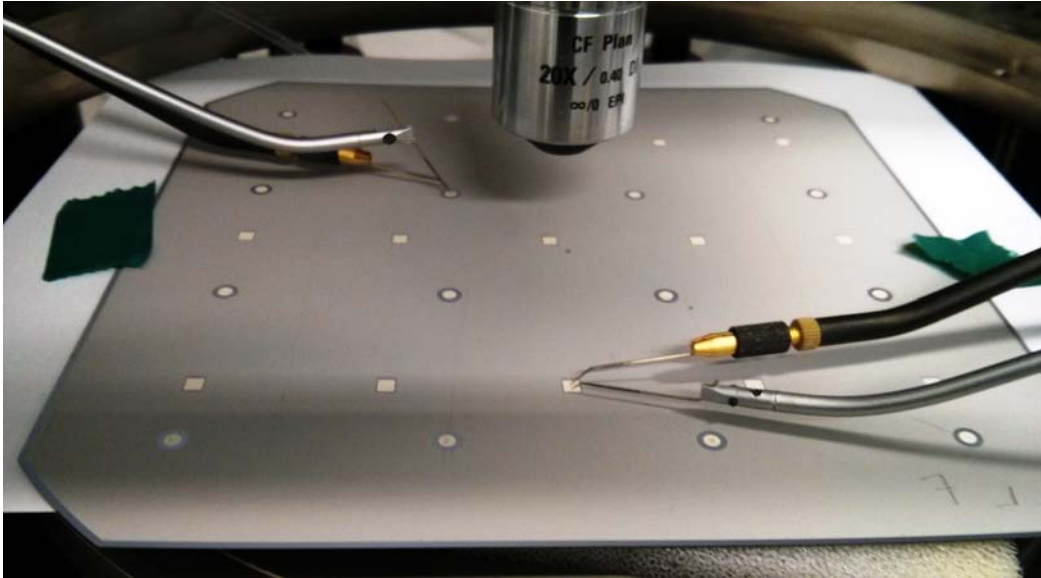


Figure 20: Immagine di una misura effettuata a quattro terminali

2.3.2 Caratteristiche I-V con LOANA

Una volta ultimate tutte le misure effettuabili, abbiamo ripreso a saldare le celle sugli appositi supporti, prestando anche attenzione al tipo di pasta conduttiva utilizzata: le prime celle infatti, hanno svolto il ruolo di cavia per testare proprio i comportamenti delle diverse paste a nostra disposizione. Infatti in questa fase sono state testate tre paste conduttive:

- *Chemitronics TDS CW2460*: una pasta saldante e conduttiva composta da due parti (una collante e una conduttiva) da mischiare in ugual concentrazione. Una volta miscelata, entro circa 60 minuti essa va completamente disposta sui pin del supporto metallico, e richiede un passaggio ad alta temperatura (100°C) per circa 15 minuti per essere definitivamente utilizzabile. Tale prodotto garantisce una resistività volumetrica inferiore a $0.001\Omega \cdot \text{cm}$.
- *MG Chemicals 8330S*: pasta collante e saldante fornita in due siringhe graduate, utili per dosare il prodotto in eguale quantità; essa dopo la miscelazione è utilizzabile per 4 ore, ma richiede un maggior tempo di cottura (a circa 65° sono necessari 60 minuti da passare nel forno,

mentre se la temperatura sale a 100° bastano 50 minuti di cottura). Da datasheet questo prodotto di alta qualità (e di relativamente alto prezzo) fornisce una resistività bassissima pari a $0.0007\Omega \cdot cm$

- *MG Chemicals 8331S*: pasta collante equivalente alla precedente, di un livello di qualità appena più basso. Essa richiede le stesse temperature e tempi di cottura per la solidificazione, ma da datasheet fornisce prestazioni di circa un ordine di grandezza più basse (resistività pari a $0.006\Omega \cdot cm$) ad un prezzo minore.

Tutte e tre le tipologie di paste conduttive avevano la base conduttiva in argento e teoricamente erano adatte ai nostri scopi; la nostra scelta è ricaduta sulla pasta *MG Chemicals 8330S*, che anche dal punto di vista pratico si è dimostrata la più malleabile e adatta.

Una volta scelta la pasta conduttiva e selezionato dei campioni adatti fra le celle a nostra disposizione, abbiamo cominciato a testare tali celle anche sotto illuminazione per mezzo di un macchinario apposito chiamato LOANA, realizzato da una ditta tedesca chiamata PV-Tools appositamente per lo studio sulle celle solari.

Esso è uno strumento molto comodo ed in grado di eseguire varie tipologie di misure e di fornire automaticamente importanti parametri del modello a due diodi delle celle solari per mezzo di algoritmi di fitting implementati direttamente all'interno del suo software.

LOANA inoltre dispone di un ripiano metallico in grado di portarsi alla temperatura impostata dall'utente, per simulare il comportamento delle celle in differenti condizioni ambientali, e quindi anche a diverse temperature (metallic thermal chuck). La temperatura è regolata attraverso un sistema di riscaldamento e raffreddamento, tenuto sotto controllo da 5 sensori disposti appunto sul chuck metallico.

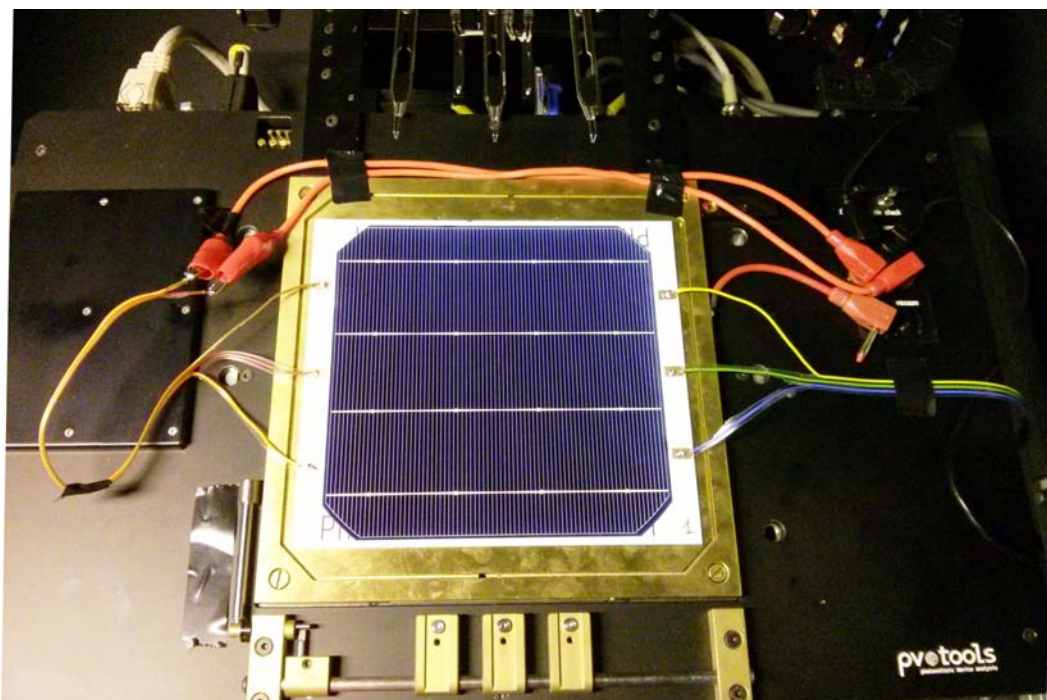


Figure 21: Immagine del setup di una misura effettuata con LOANA

All'interno dello strumento vi sono due lampade in grado di simulare la radiazione solare: una lampada allo Xenon con la quale si ottiene un riferimento per la corrente massima della cella, ed una formata da una matrice di LED infrarossi, la cui intensità viene tarata grazie al riferimento fornito dai flash della lampada allo Xenon; in base al tipo di misura impostata dall'utente quindi, LOANA è in grado di acquisire tensione e corrente circolanti sulla cella, che sia essa illuminata o completamente al buio. Abbiamo quindi deciso di affiancare le due misure svolte al buio, quella eseguita con LOANA e quella eseguita con il Keithley 2651A per paragonarle e per valutarne la robustezza. Sebbene LOANA lavori forzando la tensione ed andando a rilevare la corrente che circola sulla cella (pilotaggio in tensione, ossia al contrario rispetto al Keithley 2651A), le curve rilevate sono perfettamente sovrapponibili e consistenti.

Tale strumento dispone di importanti altre capacità, quali ad esempio un rilevatore di efficienza quantica esterna (EQE) e di riflettanza, un misuratore di spessore della cella solare, una micro camera, un sistema per rilevare l'elettroluminescenza ed altre ancora, che però non ci sono state utili ai fini delle nostre misure.

2.3.3 Termografie e Step-Stress

Una volta completate le misure sopra elencate, si è deciso di valutare e studiare il comportamento delle celle MWT sottoponendole ad uno stress per un medio periodo di tempo (90 minuti). E' stato allora deciso di applicare alle celle, attraverso la serie di tre generatori DC (E3649A), una corrente continua in polarizzazione inversa, aumentandone l'intensità ad intervalli regolari e acquisendo immagini durante lo stress stesso tramite una termocamera; la tensione veniva invece rilevata attraverso un multimetro digitale. Anche in questo caso, per interfacciare gli strumenti di misura, i generatori e la termocamera al PC è stato utilizzato un programma LabView (figura 22) che permette di impostare tutti i parametri richiesti. Lo scopo di questa misura era quello di sottoporre la cella ad uno stress intenso e per un periodo di tempo relativamente lungo: così facendo, grazie alle immagini acquisite dalla termocamera, siamo stati in grado di individuare gli "hot spot" della cella, ovvero i punti attraverso i quali era più marcato il passaggio di corrente. Essa, concentrandosi su punti ben definiti della cella, era la causa di un aumento della temperatura locale, come è evidente nelle immagini ottenute e presentate nel capitolo finale di questa tesi.

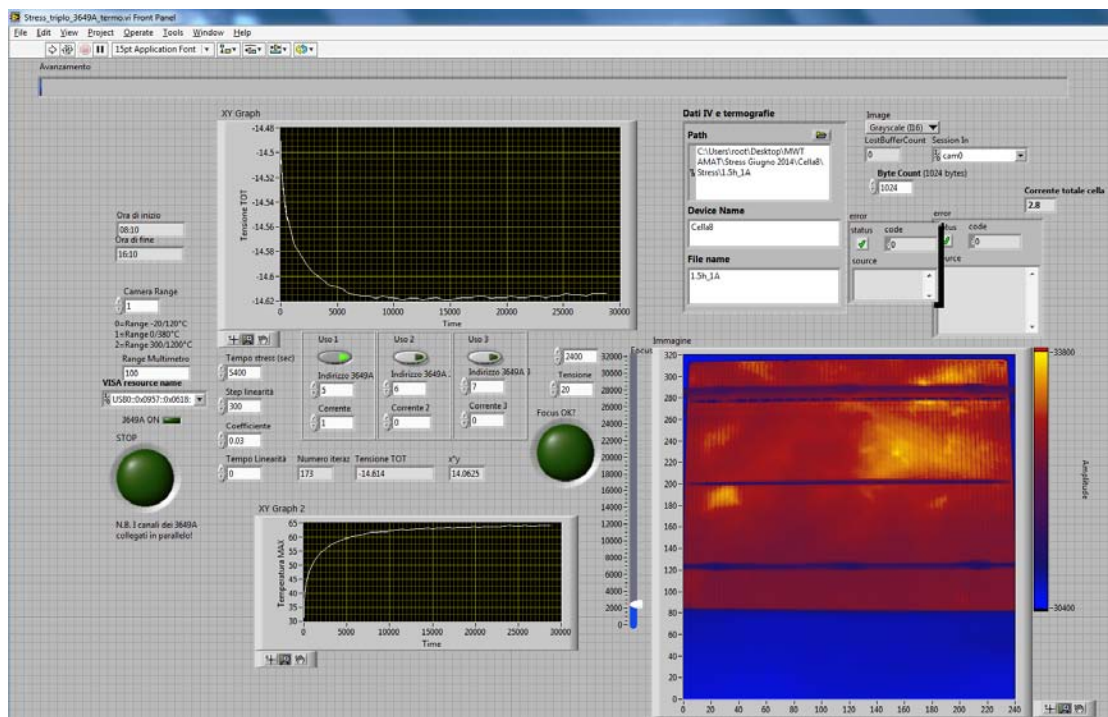


Figure 22: Screenshot del programma LabView utilizzato per lo step-stress

Dopo ogni periodo di stress inoltre sono state ripetute le misure di caratteristica I-V con LOANA ed Keithley 2651A per studiare una possibile variazione del comportamento e della cella: per fare ciò, ad ogni step la cella in esame è stata riportata alla temperatura ambiente (circa 25/27°) tramite il chuck termico in dotazione a LOANA. Infine sono state eseguite anche delle misure di “termografia in impulsata”, dove è stata usata appunto una corrente ad impulsi per polarizzare la cella, diversamente dalla corrente continua utilizzata per effettuare lo stress. Questa misura è stata eseguita per valutare la consistenza e l’accuratezza di questo differente metodo di misura che comunque fornisce risultati interessanti e concreti.

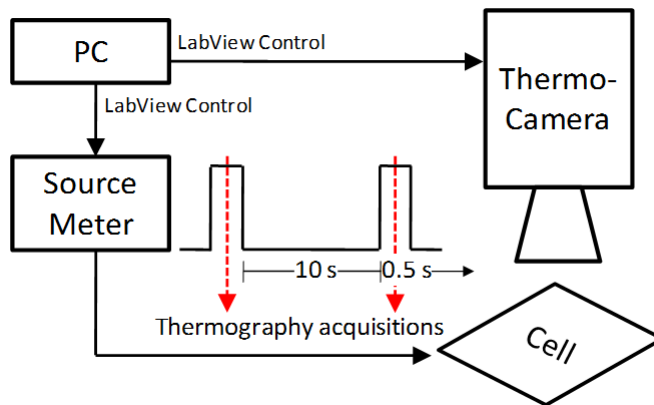


Figure 23: Schema a blocchi per la misura di termografia in impulsata

Come si può osservare nella figura 23 dove è presentato una specie di schema a blocchi del setup di misura, esso consiste nei seguenti passi:

- la cella viene polarizzata inversamente tramite un impulso di corrente per un periodo di tempo regolabile da interfaccia LabView (nel nostro caso $500ms$)
- appena la tensione sulla cella si stabilizza, un’immagine viene acquisita per mezzo della termocamera
- la cella viene quindi lasciata riposare per un più lungo intervallo temporale, anche questo regolabile dall’interfaccia LabView (circa una decina di secondi nel nostro caso); questo step viene eseguito per poter lasciare la cella a riposo e quindi per farla tornare alla condizione iniziale evitando che si surriscaldi in maniera generalizzata

- si ripete la polarizzazione di $500ms$, l'acquisizione e il riposo per la cella per un numero arbitrario di passaggi, al termine dei quali si ottiene l'immagine termografica complessiva, mediando le varie acquisizioni per eliminare i possibili disturbi e rumori di misura e quindi migliorando la risoluzione della stessa

L'interfaccia LabView di questa misura non è molto differente rispetto a quella utilizzata per lo step-stress, ed anch'essa ci permette di regolare i parametri di interesse per effettuare una corretta acquisizione delle immagini, fra i quali ricordiamo l'intensità dell'impulso di corrente, la durata dell'impulso, il tempo di riposo fra due impulsi successivi ed il numero delle acquisizioni fra cui mediare per ottenere l'immagine finale.

2.4 Problematiche Incontrate

Siccome nel campo della ricerca sulle celle MWT si stanno compiendo ancora i primi passi e non vi è una completa conoscenza dei meccanismi che ne regolano il funzionamento, non tutto è sempre funzionato al primo tentativo nelle nostre misure. Infatti, numerose sono ancora le incognite sulle motivazioni di alcuni comportamenti particolari di queste celle, e molte sono le variabili che potenzialmente le influenzano. Con il nostro studio pertanto, cerchiamo di dare alcune basi per lo sviluppo ed il proseguo di tale ricerca, evidenziando ciò che fino ad ora abbiamo incontrato.

Di seguito si riportano quindi le principali problematiche incontrate da novembre ad oggi nello studio delle celle MWT, con una eventuale breve spiegazione di come sono state fronteggiate:

- *Estrema Fragilità e Delicatezza*: dal punto di vista fisico-meccanico, queste celle si presentano come sottilissimi fogli di silicio monocristallino; esse sono molto delicate e per maneggiarle occorre indossare degli appositi guanti in gomma, per non depositare impurità sulla superficie delle stesse. Inoltre, siccome sono spesse qualche centinaio di micron, bisogna stare molto attenti nell'utilizzarle, non bisogna applicarci grande forza per contattarle o semplicemente per spostarle, poichè ad ogni minimo colpo c'è la possibilità che la struttura cristallina si rompa irreparabilmente.

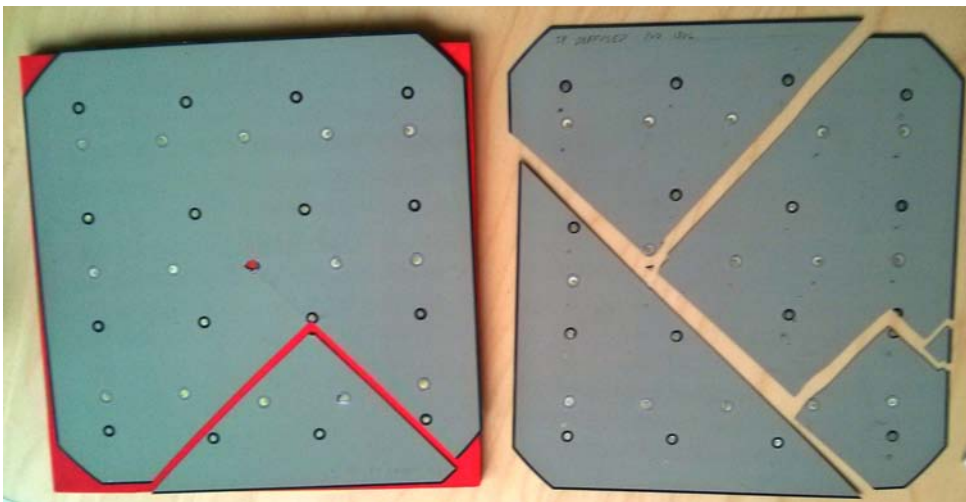


Figure 24: Immagine di due celle che hanno subito una rottura fisica

- *Scelta della Pasta Conduttiva e Contattatura*: siccome quando si parla di migliorare dell'1% o 2% l'efficienza di un dispositivo anche il più piccolo spreco di potenza va eliminato, la scelta che abbiamo fatto è ricaduta sulla pasta che meglio ha soddisfatto le nostre esigenze. Per capirlo, ci siamo affidati ad alcune prove pratiche, per selezionare una fra le tre paste che nelle specifiche tecniche erano adatte al nostro scopo. Sebbene grande attenzione è stata posta nella fase della contattatura delle celle, bastava una piccola disattenzione o un minimo errore per compromettere il corretto utilizzo della cella. Infatti è sufficiente che un solo pin sia in cortocircuito (ossia che ci sia della pasta che contatta terminale p e terminale n contemporaneamente) per rendere il comportamento della cella pari a quello di una resistenza, e cioè inutile ai fini pratici. Tale comportamento si può conoscere solo una volta ultimata la contattatura, in fase di testaggio, ed è irreversibile; in un paio di occasioni si è cercato infatti di “staccare” la cella dal supporto metallico, ma l'esito è stato distruttivo (figura 24).
- *Ripetibilità delle Misure*: si è osservato che il processo di saldatura e contattatura della cella sul supporto va a variare le caratteristiche elettriche della cella; d'altro canto, anche lasciare la cella non saldata comporta un degrado e una modifica delle sue proprietà, in quanto entrano in gioco fattori quali l'ossidazione dei contatti e il degrado generico: le celle infatti ci vengono fornite per quello che sono, senza alcun tipo di incapsulamento o protezione proprio per non variare in nessun modo le loro caratteristiche. Tale argomento sarà affrontato nel capitolo finale di questa tesi, e saranno portati vari esempi a riguardo.

3 Risultati Ottenuti e Obiettivi Futuri

3.1 Misure a 2 Terminali e Caratteristiche I-V 4 Terminali

Le prime nostre misure svolte con una semplice tecnica a due terminali erano abbastanza imprecise, ma tuttavia ci hanno comunque permesso di portare alla luce un problema che si pensava fosse risolto: non tutte le celle solari MWT presentavano caratteristiche omogenee e egualmente distribuite sulla loro superficie. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che parte della lavorazione necessaria per ricavare la cella finale da uno stesso wafer di silicio viene effettuata manualmente, inserendo quindi piccole imprecisioni e differenze fra diversi prodotti finiti. La misura in questione è un semplice rilevamento di resistenza effettuato a quattro terminali su una cella ottenuta per impiantazione ionica, dove i fori sono stati effettuati dopo l'impiantazione, senza aver effettuato il processo di isolamento dei bordi e stampando un'unica volta il retro della cella (implanted, drill after implant, SP on back, no edge isolation). Tale cella, chiamata "Cella 3", è stata inoltre contattata manualmente attraverso dei semplici cavetti saldati tramite una pasta d'argento a rapidissima solidificazione al fine di poter eseguire misure anche con LOANA e non solamente attraverso i puntali di precisione.

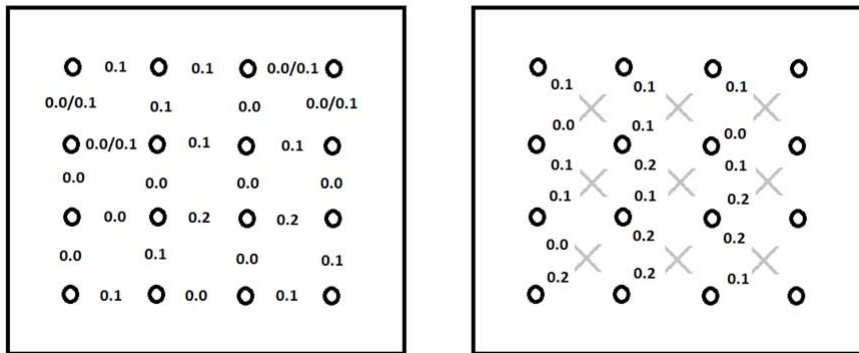


Figure 25: Immagine schematica della misura di resistenza fra pin adiacenti

Come si può notare in figura 25, il comportamento della cella non è assolutamente costante su tutta la sua superficie e viene ulteriormente evidenziato dalle caratteristiche I-V presentate di seguito.

Le seguenti caratteristiche I-V sono state ricavate collegando differenti pin fra loro ed eseguendo una misura al buio, come mostrato nelle immagini a

destra; sono inoltre stati evidenziati i terminali di *force* e quelli di *sense*. La figura 26 presenta tutte le misure effettuate in uno stesso grafico, mentre quelle seguenti confrontano una misura effettuata a quattro terminali con quella a due terminali.

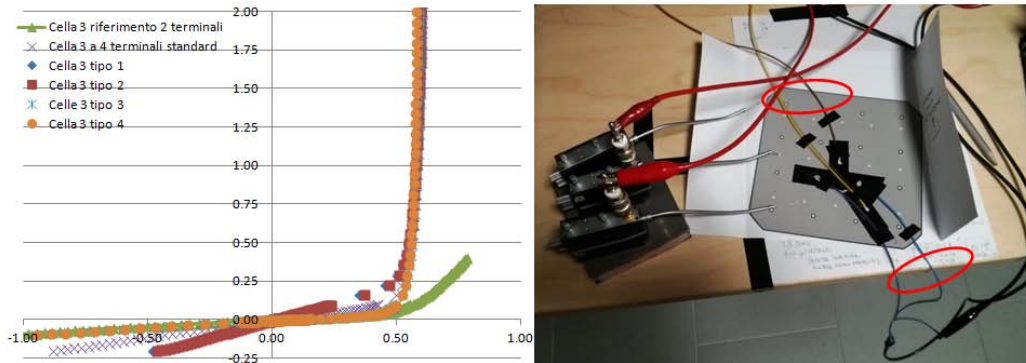


Figure 26: Caratteristiche I-V ricavate collegando differenti terminali della stessa cella (a sinistra); dettaglio del setup di misura (a destra)

In questo grafico complessivo vi sono varie curve; esse rappresentano:

- Cella 3 riferimento 2 terminali: Misura effettuata a due terminali, posizionando le micropunte su pin centrali
- Cella 3 a 4 terminali standard: Misura effettuata con i 4 fili saldati sul retro della cella cerchiati in rosso in figura 26.
- Cella3 tipo 1: misura effettuata come da immagine in figura 27
- Cella3 tipo 2: misura effettuata come da immagine in figura 28
- Cella3 tipo 3: misura effettuata come da immagine in figura 29
- Cella3 tipo 4: misura effettuata come da immagine in figura 30

Già ad una prima occhiata si nota che le curve non sono totalmente sovrapponibili, sebbene siano state ottenute da una stessa cella. Inoltre anche le loro pendenze non sono costanti, indice che al variare dei pin scelti entrano in gioco differenti valori di resistenza.

L'unica parte delle caratteristiche I-V (ottenute a quattro terminali) che si sovrappone è quella in "alta" tensione, ossia oltre i 0,5V quando la corrente sulla cella comincia ad aumentare in modo deciso: la curva ottenuta con

la misura a due terminali rimane più schiacciata e meno pendente, e tale comportamento è imputabile ad una resistenza serie maggiore introdotta con questo setup di misura.

Anche la parte negativa delle caratteristiche presenta pendenze diverse fra le varie curve: in questo caso però le discrepanze sono imputate alle differenti *resistenze shunt* offerte dalla cella al variare dei “percorsi” intrapresi dalla corrente.

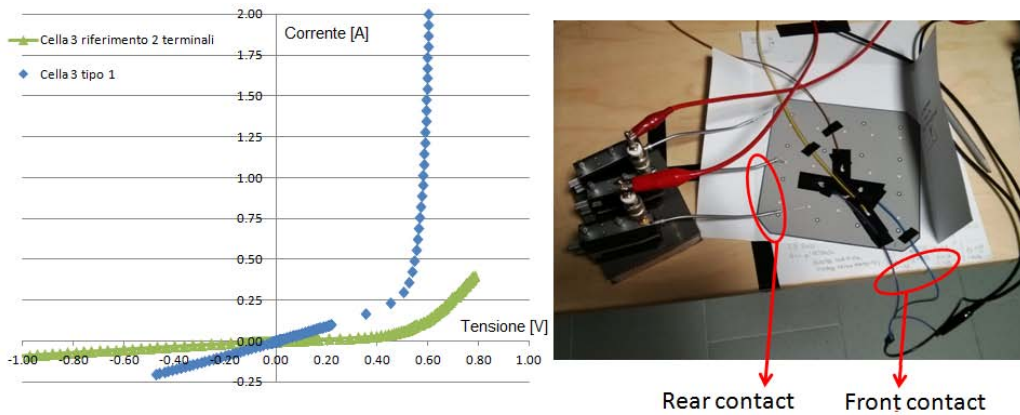


Figure 27: Confronto fra caratteristiche I-V ricavate a due terminali e a quattro terminali, come da configurazione a destra

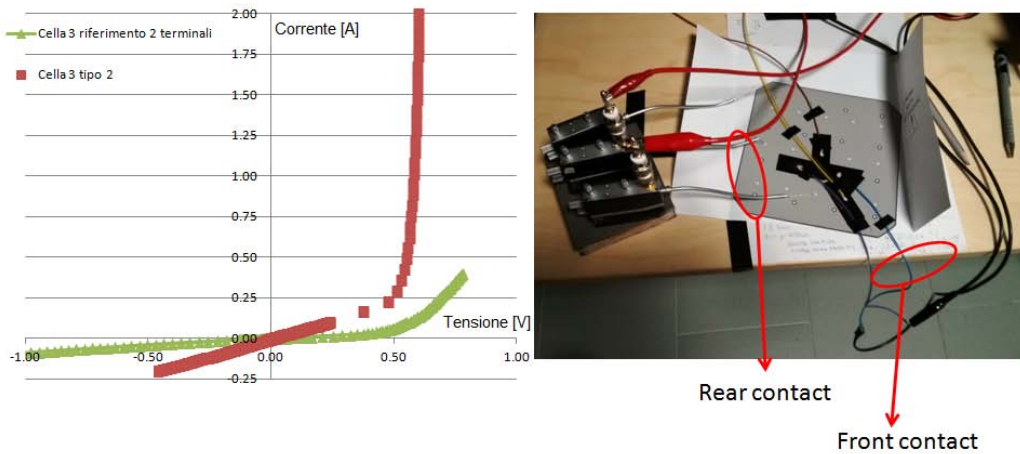


Figure 28: Confronto fra caratteristiche I-V ricavate a due terminali e a quattro terminali, come da configurazione a destra

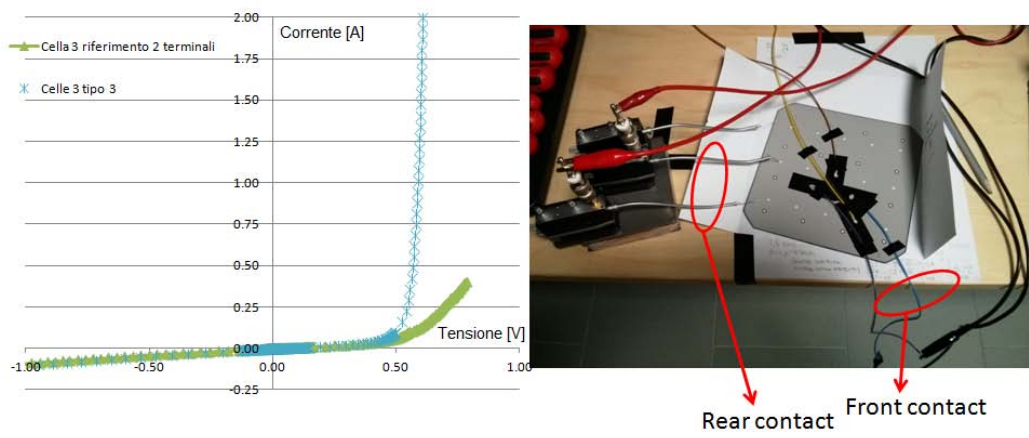


Figure 29: Confronto fra caratteristiche I-V ricavate a due terminali e a quattro terminali, come da configurazione a destra

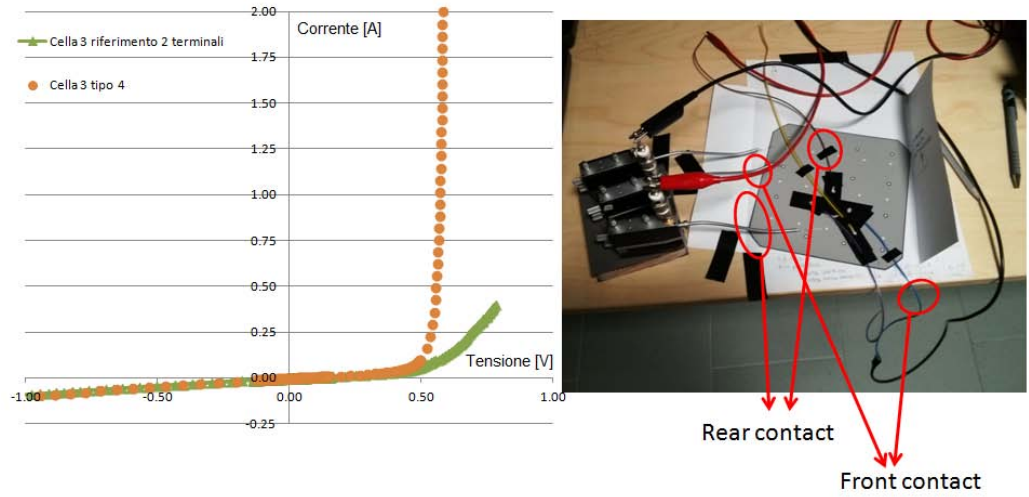


Figure 30: Confronto fra caratteristiche I-V ricavate a due terminali e a quattro terminali, come da configurazione a destra

Dopo questi primi risultati è stato deciso di investigare se questo comportamento era diffuso su tutte le celle che avevamo a disposizione per i nostri test. Così sono state eseguite almeno tre misure per ogni altra cella del set, per ottenere le caratteristiche I-V in diverse configurazioni: per questo scopo sono stati considerati pin adiacenti, pin a media distanza e pin sulle pareti opposte della cella. In base ad i risultati ottenuti con queste misure abbiamo scelto un paio di celle da saldare sui supporti metallici (figura 17)

a seconda del loro comportamento e delle loro caratteristiche intrinseche. In figura 31 vengono presentati due esempi: a sinistra si ha la Cella 9, che risponde in maniera uniforme al variare dei punti di acquisizione dei dati; a destra la Cella 1 invece mostra un comportamento non stabile, come si può facilmente notare dai “salti” presenti sul grafico. Tutte queste misure sono state effettuate con il generatore Keithlay 2651A ed un multimetro digitale, pilotati e regolati tramite l’interfaccia presentata in figura 19.

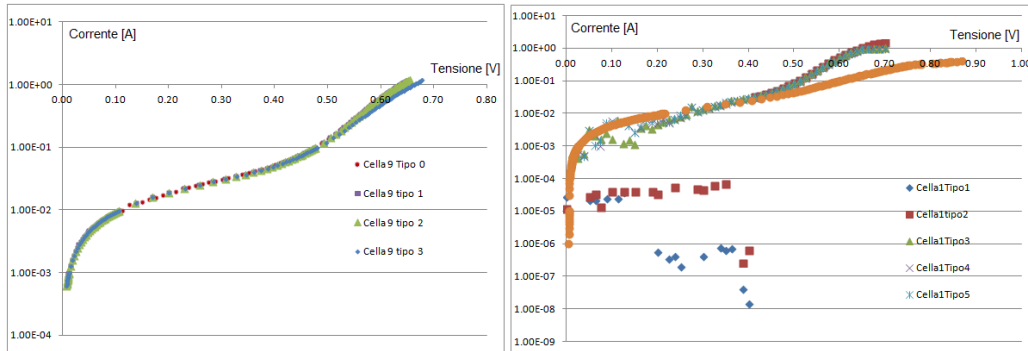


Figure 31: Grafici semilogaritmici per il confronto di caratteristiche I-V di celle differenti

Al termine quindi delle numerose prove effettuate per trovare delle celle adatte ai nostri scopi, è stato deciso di focalizzare la nostra attenzione su un paio di celle fra i vari campioni fornitoci da AMAT, poichè soddisfavano i requisiti di stabilità e uniformità di caratteristiche elettriche. C’è da dire inoltre che la ditta di Treviso ha recentemente sospeso il finanziamento al loro progetto di ricerca sulle MWT, motivo per cui queste ultime celle potenzialmente potevano essere ossidate o leggermente deteriorate. Ciò non ci ha impedito di ottenere una serie di risultati interessanti e concreti, che saranno riportati nel prossimo paragrafo.

3.2 Step Stress in Polarizzazione Inversa

Come spiegato nel capitolo precedente, è stato svolto uno step-stress su una coppia di celle MWT, fabbricate con due differenti processi produttivi.

La prima, chiamata Cella 8, è stata ottenuta con drogaggio per impiantazione, con la foratura laser prima dell'impiantazione, con una singola stampa della faccia posteriore e senza isolamento dei bordi (implanted, drill before implant, SP on back, no edge isolation); la seconda, chiamata Cella 14, ottenuta con drogaggio per diffusione, forata con il laser prima del drogaggio, con singola stampa del retro e con isolamento dei bordi (diffused, drill before diffusion, SP on back, edge isolation).

Queste due celle sono state sottoposte ad uno step-stress, il cui procedimento è stato descritto nel capitolo precedente; di seguito verranno esposti e analizzati i risultati ottenuti, effettuando un paragone fra i due campioni.

3.2.1 Cella 8: Implanted, Drill Before Implant, SP on Back, No Edge Isolation

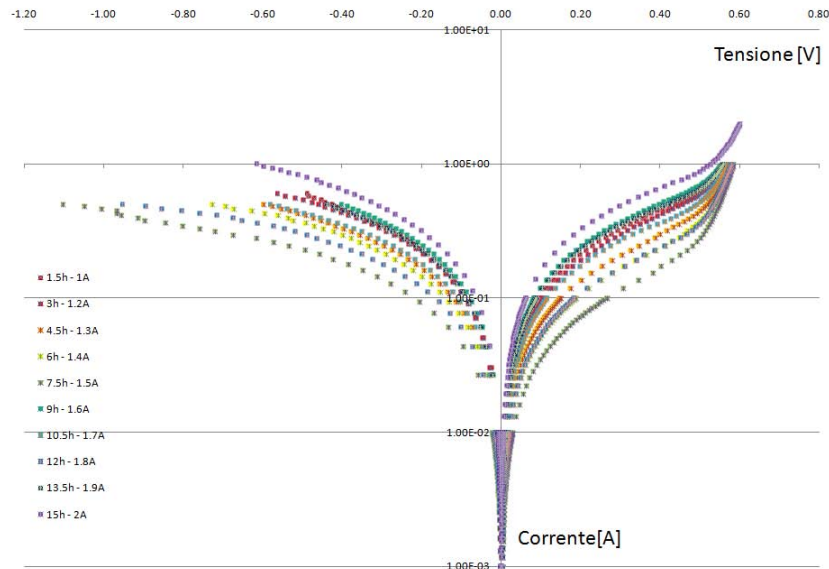


Figure 32: Grafico delle caratteristiche I-V effettuate con Keihlay 2651A dopo ogni passo dello step-stress della Cella 8

In figura 32 sono riportate le caratteristiche I-V effettuate al buio sulla Cella 8 dopo ogni passo dello stress da noi eseguito. Tale grafico ci fornisce una

prima idea sul comportamento della cella: le curve infatti non sono sovrapponibili, le pendenze sono differenti e come vedremo di seguito, anche le immagini termografiche rilevate confermeranno questi cambiamenti.

Come già introdotto, la diversa pendenza delle curve ci fa pensare ad una differente resistenza “vista” dalla corrente che circola sulla cella. Ciò è possibile in quanto durante lo stress si è evidenziato che la corrente ha dei percorsi preferenziali i quali però possono variare: è proprio questa modifica a far cambiare le caratteristiche elettriche del campione. Il fatto che le curve, specialmente a tensione positiva, abbiamo andamenti notevolmente differenti, ci fa ipotizzare che anche i parametri caratteristici dei diodi del modello della cella, l'efficienza ed il fattore di riempimento subiscano una variazione durante le misure effettuate. Di seguito presentiamo passo dopo passo le principali immagini rilevate dalla termocamera affiancate dai parametri elettrici che abbiamo ritenuto importanti per far capire il comportamento della cella in esame.

Step 1: 1.5h @1A in polarizzazione inversa a corrente continua

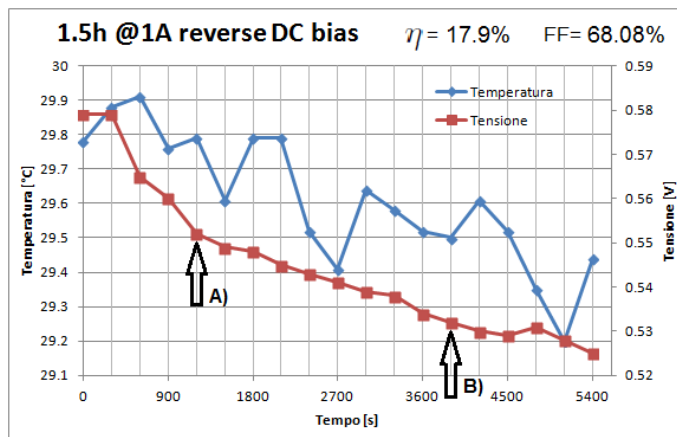


Figure 33: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 1 dello stress in polarizzazione inversa

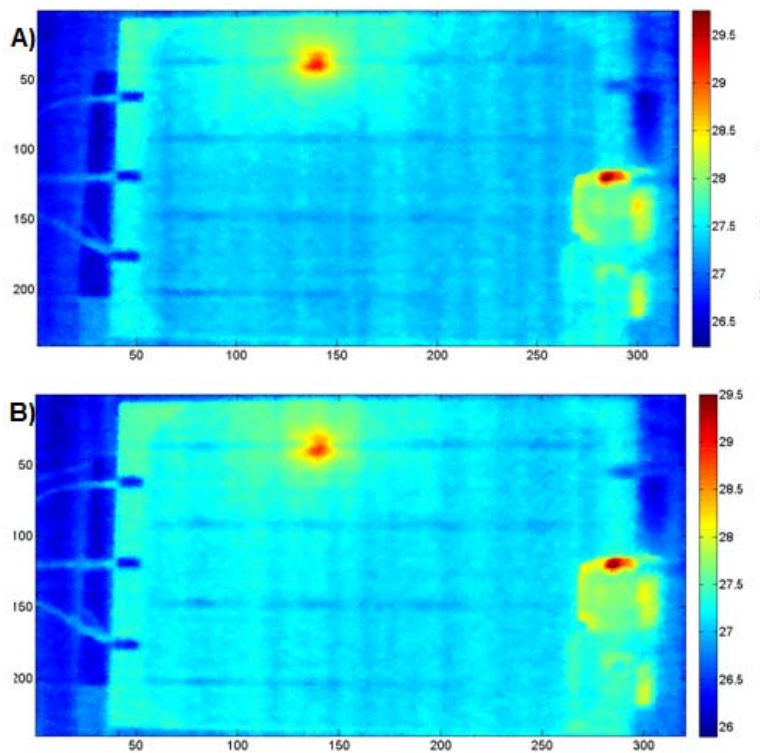


Figure 34: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 33

Step 2: 3h @1.2A in polarizzazione inversa a corrente continua

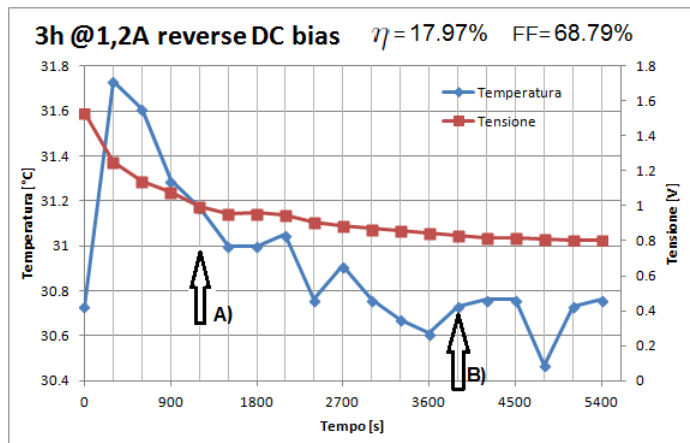


Figure 35: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 2 dello stress in polarizzazione inversa

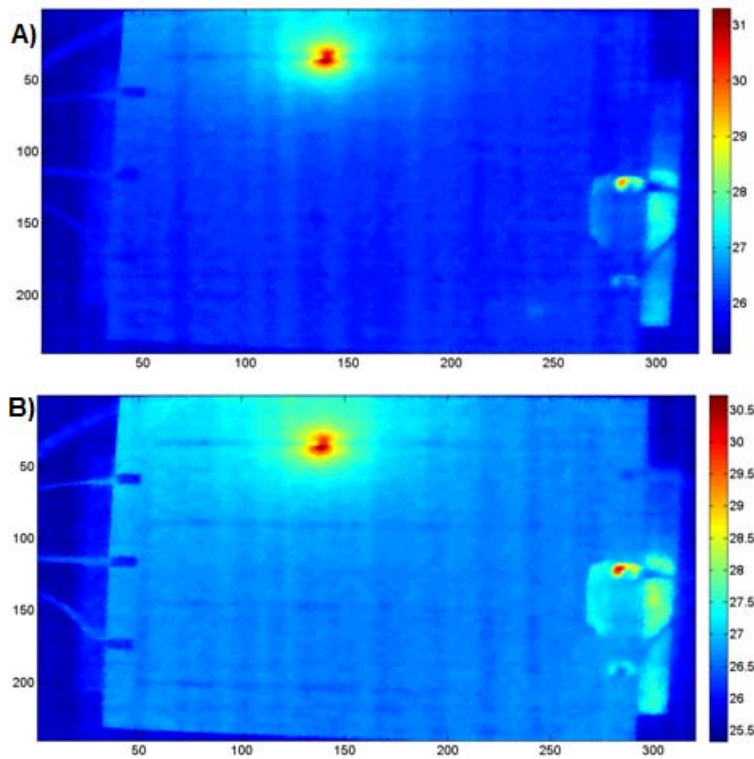


Figure 36: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 35

Step 3: 4.5h @1.3A in polarizzazione inversa a corrente continua

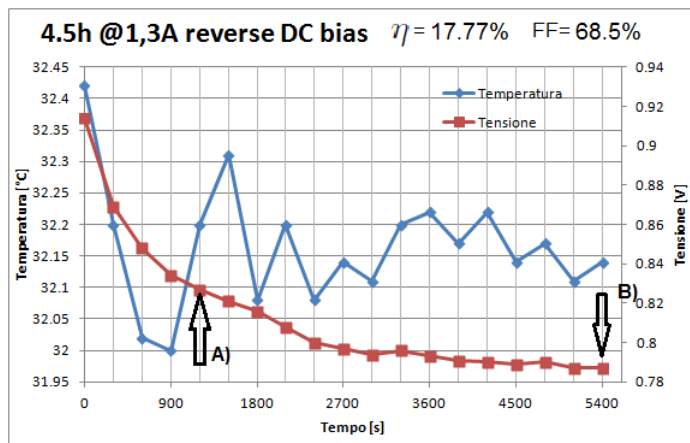


Figure 37: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 3 dello stress in polarizzazione inversa

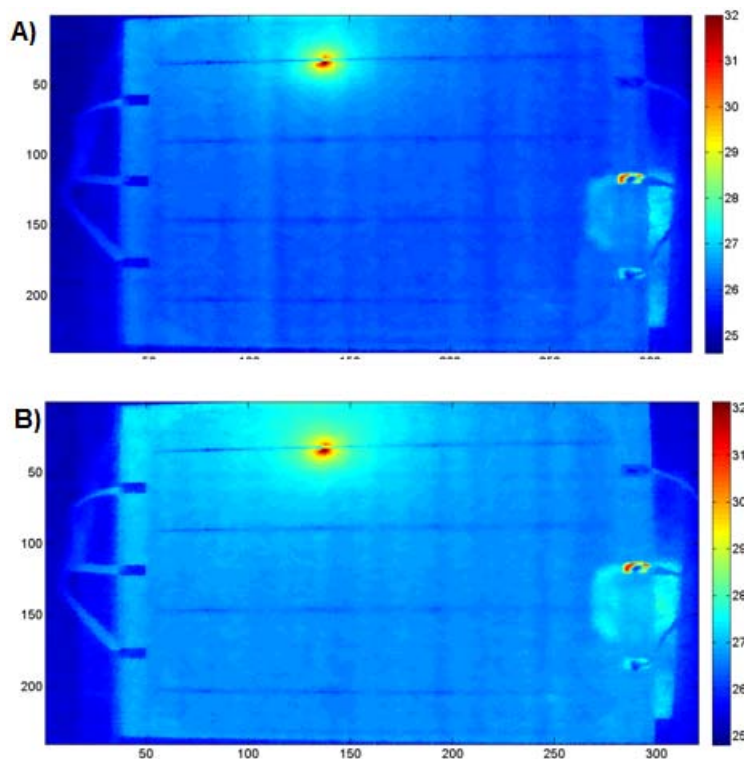


Figure 38: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 37

Step 4: 6h @1.4A in polarizzazione inversa a corrente continua

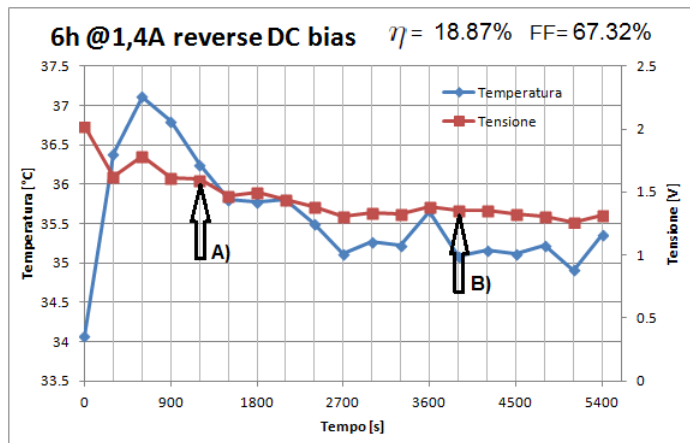


Figure 39: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 4 dello stress in polarizzazione inversa

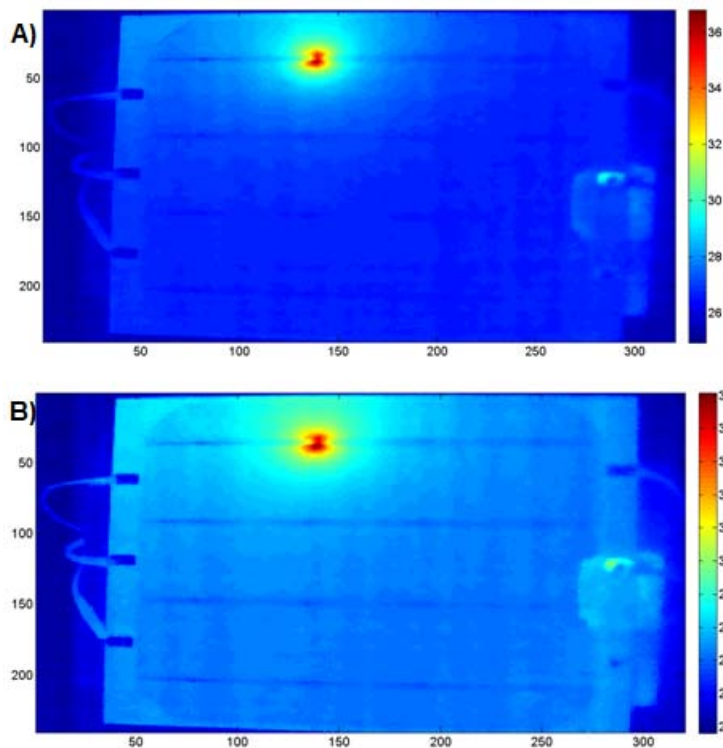


Figure 40: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 39

Step 5: 7.5h @1.5A in polarizzazione inversa a corrente continua

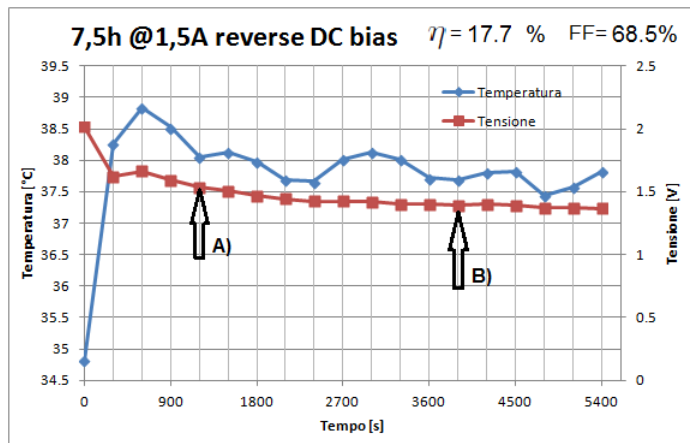


Figure 41: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 5 dello stress in polarizzazione inversa

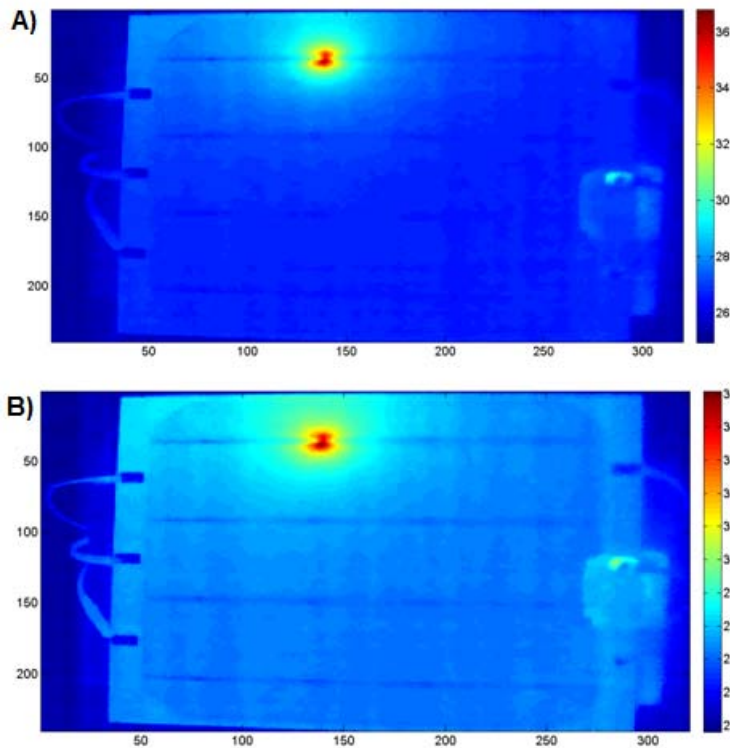


Figure 42: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 41

Step 6: 9h @1.6A in polarizzazione inversa a corrente continua

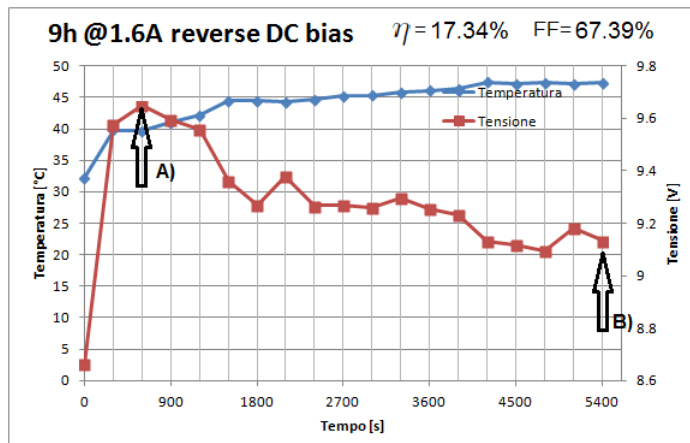


Figure 43: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 6 dello stress in polarizzazione inversa

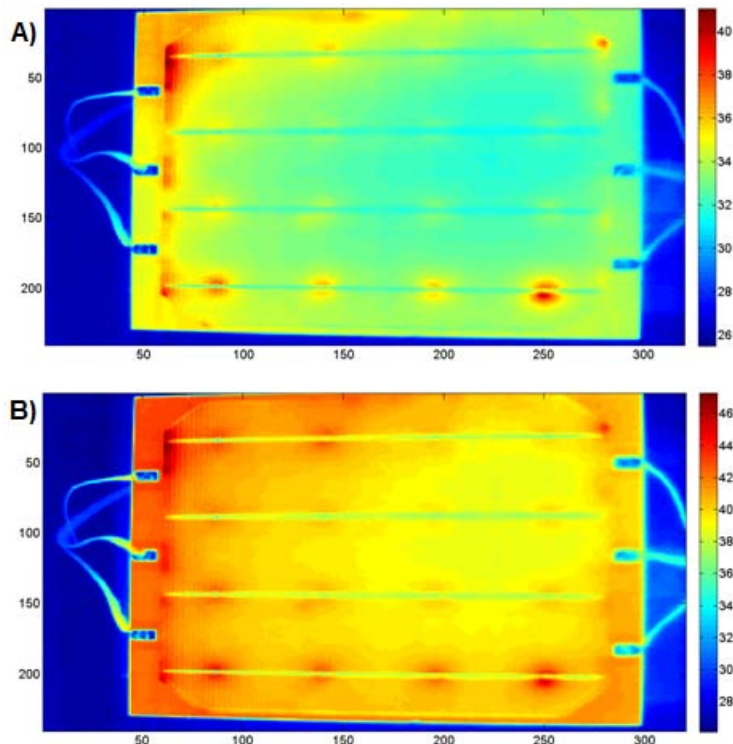


Figure 44: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 43

Step 7: 10.5h @1.7A in polarizzazione inversa a corrente continua

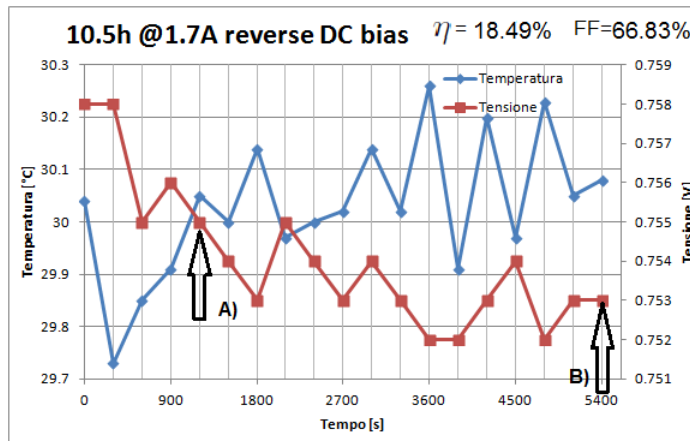


Figure 45: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 7 dello stress in polarizzazione inversa

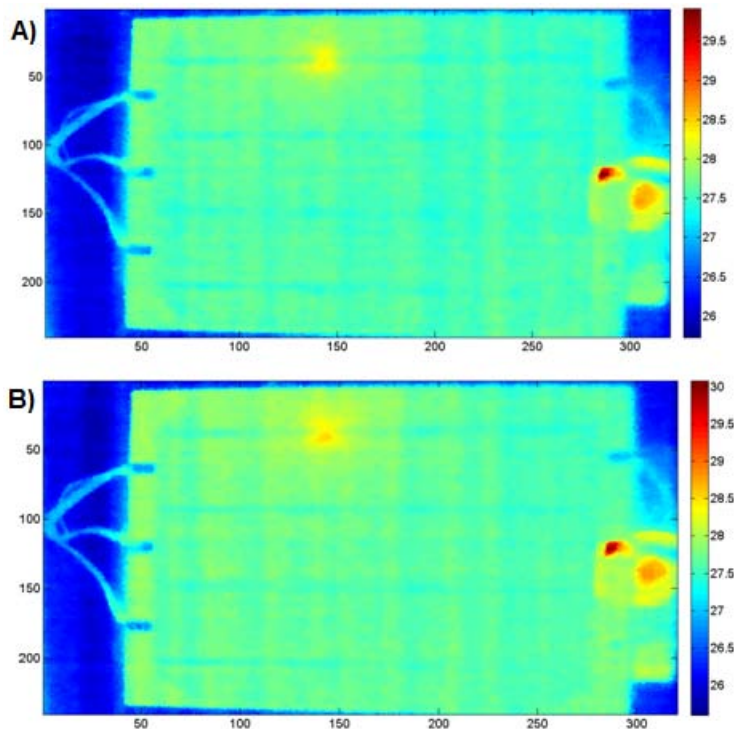


Figure 46: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 45

Step 8: 12h @1.8A in polarizzazione inversa a corrente continua

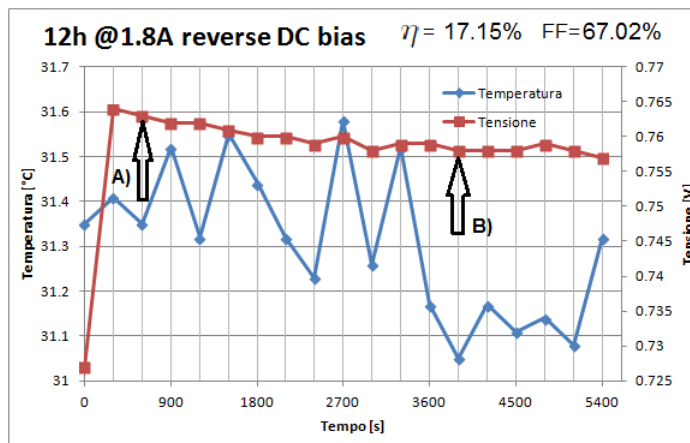


Figure 47: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 8 dello stress in polarizzazione inversa

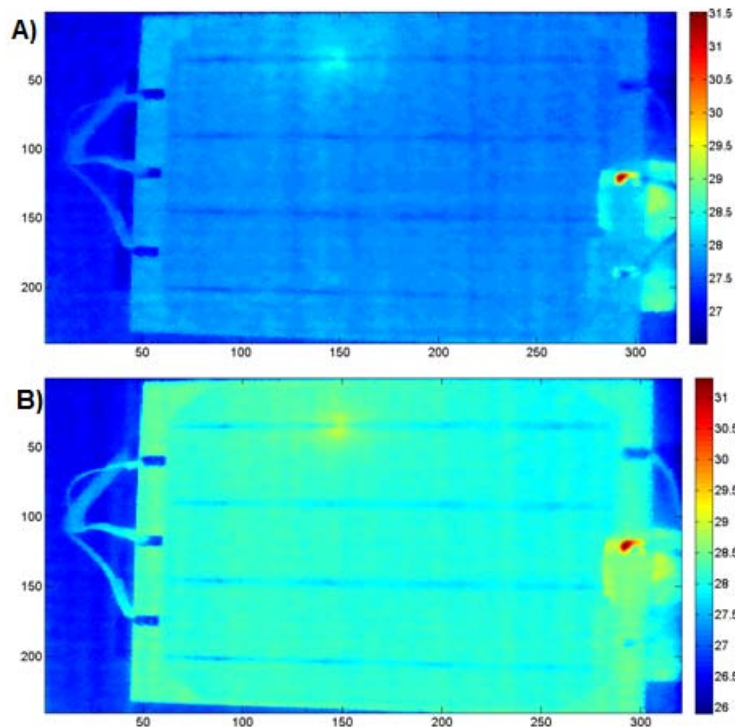


Figure 48: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 47

Step 9: 13.5h @1.9A in polarizzazione inversa a corrente continua

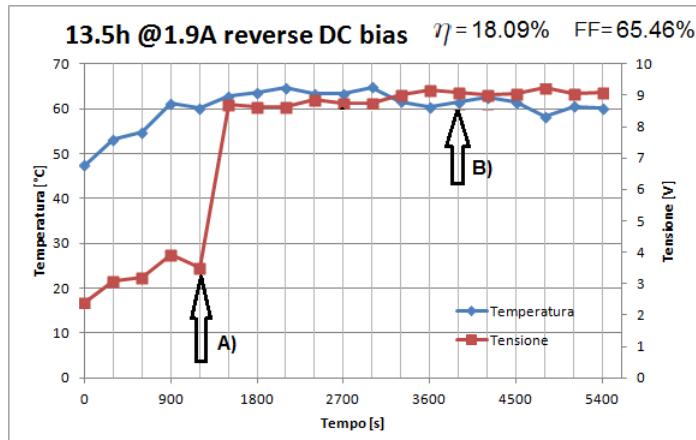


Figure 49: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 9 dello stress in polarizzazione inversa

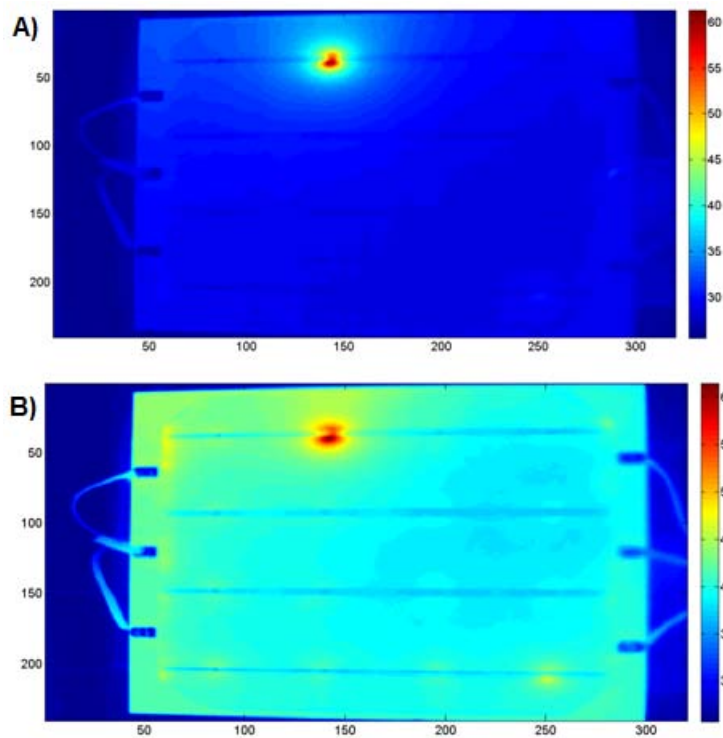


Figure 50: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 49

Step 10: 15h @2A in polarizzazione inversa a corrente continua

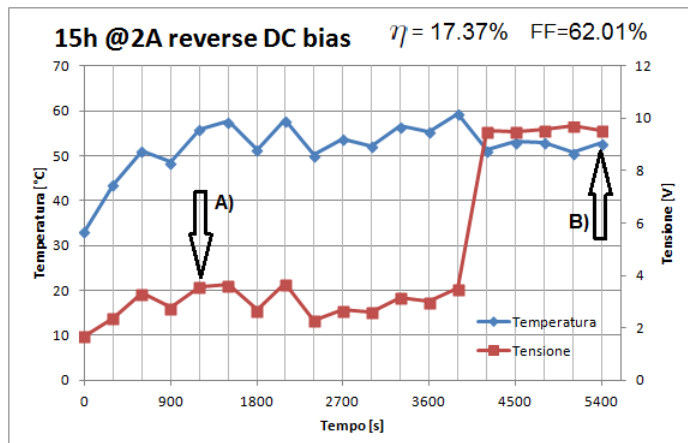


Figure 51: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 1 dello stress in polarizzazione inversa

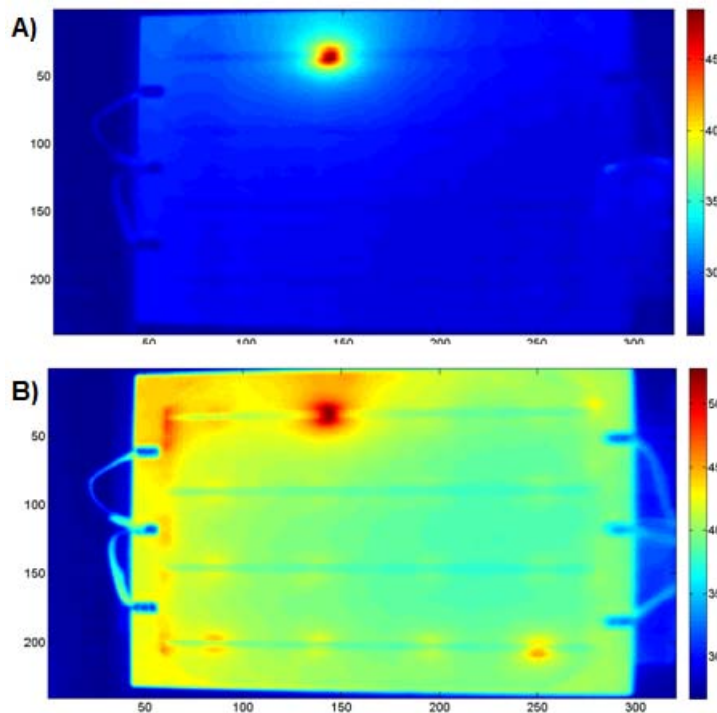


Figure 52: Immagini termografiche della Cella 8 rilevate nei punti indicati in figura 51

Da questi rilevamenti appare evidente che il comportamento della Cella 8 non è stato lineare e stabile durante lo stress. Si possono notare infatti tre “punti di instabilità”, evidenti sia dai grafici di tensione e temperatura, sia dalle immagini termografiche: essi appaiono agli step 6, 9 e 10.

In questi tre passi dello stress, la termografia ha mostrato che la corrente non si concentra più in un unico spot come aveva fatto fino allo step 5, ma si diffonde e distribuisce su tutta la cella, provocando quindi il riscaldamento di tutti gli altri pin. In corrispondenza a questo comportamento, si ha una variazione notevole anche della tensione ai capi della cella: allo step 6 si può notare come essa si porti quasi subito attorno ai 9V (era rimasta sempre sotto i 2V nei passaggi precedenti), mentre negli step 9 e 10 questa variazione richiede più tempo (rispettivamente circa 20 minuti e 70 minuti).

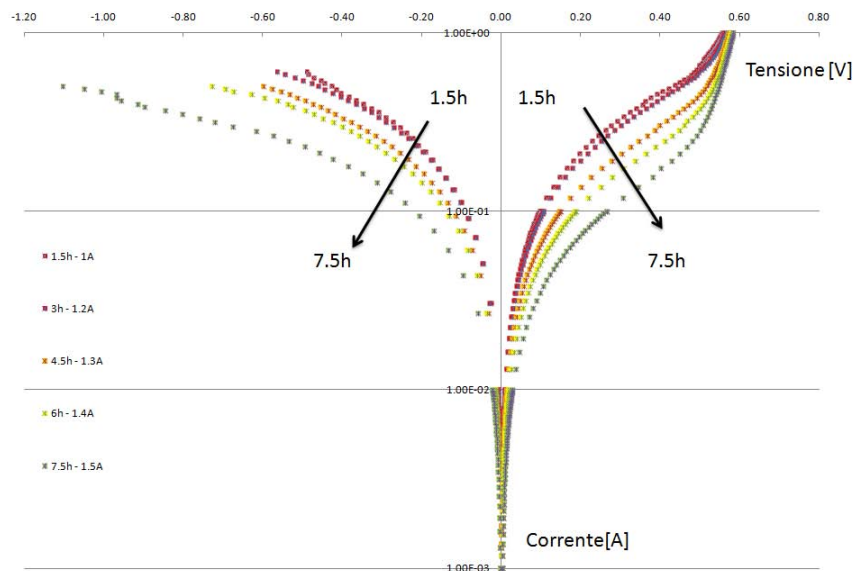


Figure 53: Grafico delle caratteristiche I-V effettuate con Keihlay 2651A dei primi cinque passi dello step-stress

Una conseguenza di tale comportamento si nota anche nelle caratteristiche I-V misurate dopo ogni periodo di stress: se fino al passo numero 5 era possibile individuare un trend (53), dopo lo step 6 si ha un nuovo innalzamento delle curve, che si riportano quasi vicino ai valori iniziali (figura 32). Tale spostamento verso l’alto si ha nuovamente dopo i passi 9 e 10, ed è evidente in figura 54. Il riscaldamento totale e diffuso della cella provoca inoltre un miglioramento del parametro dell’efficienza: allo step 7 infatti, tale valore raggiunge il picco massimo di 18.49% (inizialmente l’efficienza era circa il

18%); anche allo step 9 si nota questo comportamento, ma in questo caso esso è leggermente meno marcato.

Una possibile spiegazione sta nel fatto che la corrente riscalda in maniera uniforme la cella e diffonde il calore partendo proprio dai punti dove essa è saldata al substrato: ciò avviene solo quando si ha la “diffusione” e la distribuzione della corrente su tutti i terminali disponibili. Tale riscaldamento potenzialmente può modificare la qualità dell'accoppiamento fra cella e substrato metallico, evidentemente migliorandone le prestazioni.

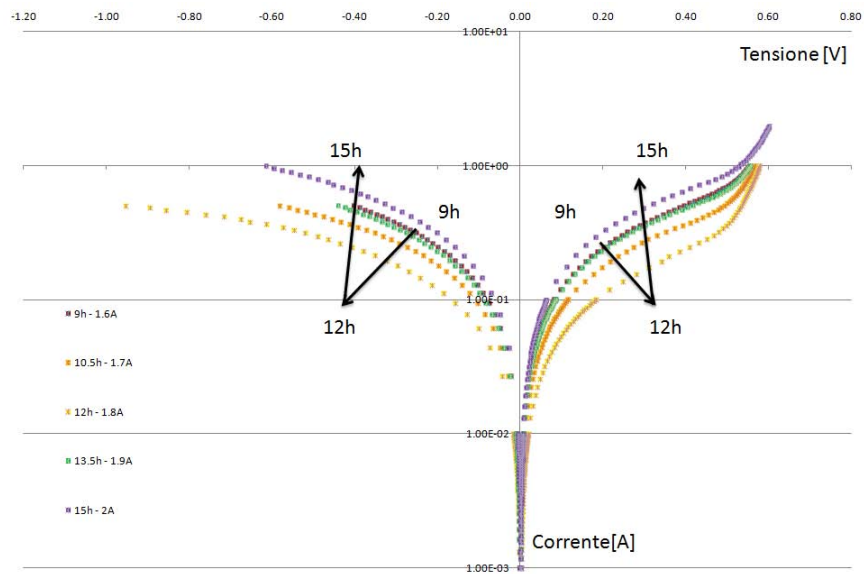


Figure 54: Grafico delle caratteristiche I-V effettuate con Keihlay 2651A dopo il primo effetto di “corrente diffusa”

3.2.2 Cella 14: Diffused, Drill Before Diffusion, SP on Back, Edge Isolation

Diversamente da quanto osservato per la Cella 8, la Cella 14 si comporta in maniera più lineare ed uniforme. Il grafico 55 mostra le caratteristiche I-V prese dopo i vari passi di stress, ed inoltre mette in evidenza il trend secondo cui tali curve si sono spostate. Anche le termografie presentate nelle pagine successive sottolineano tale comportamento, in quanto si ha che i punti della cella attraverso i quali la corrente circola non subiscono variazioni o spostamenti. L'unico fattore che distingue un'immagine dall'altra è la temperatura alla quale gli hotspot si portano: se al primo step la temperatura della cella era passata dai 27°C circa ai 32°C dopo che 1A è stato forzato a circolare per 1 ora e mezza, nell'ultimo step, con una corrente di 4.5A si raggiungono temperature di oltre 80°C. Le nostre misure si sono arrestate a questo punto, sebbene un modulo fotovoltaico in piena illuminazione può raggiungere anche intensità di corrente di oltre 8A.

L'importante parametro dell'efficienza in questa cella segue un trend negativo e passa dal 16.25% del primo step al 13.73% dell'ultimo: tale diminuzione è stata attribuita ad una variazione della R_{sh} ed a una progressiva e costante degradazione della cella e delle sue caratteristiche.

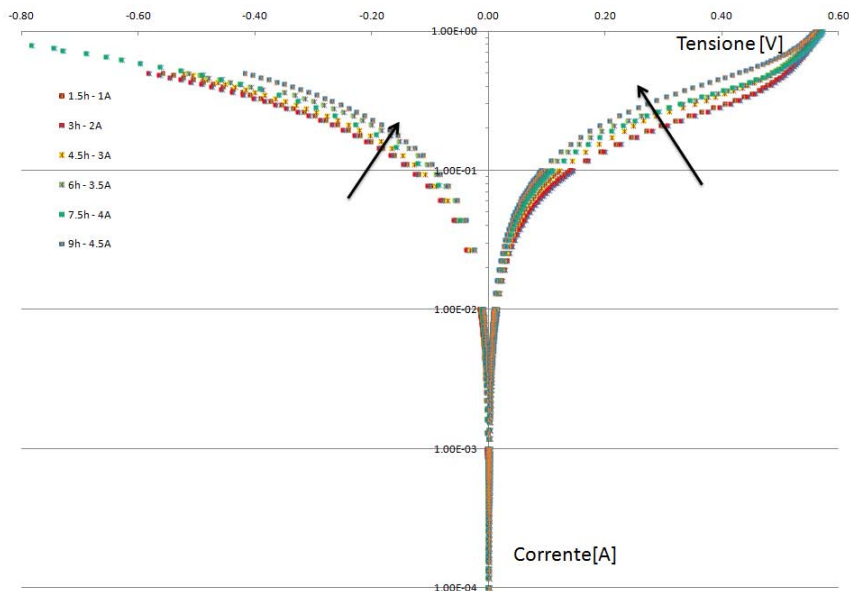


Figure 55: Grafico delle caratteristiche I-V effettuate con Keihlay 2651A sulla Cella 14

Step 1: 1.5h @1A in polarizzazione inversa a corrente continua

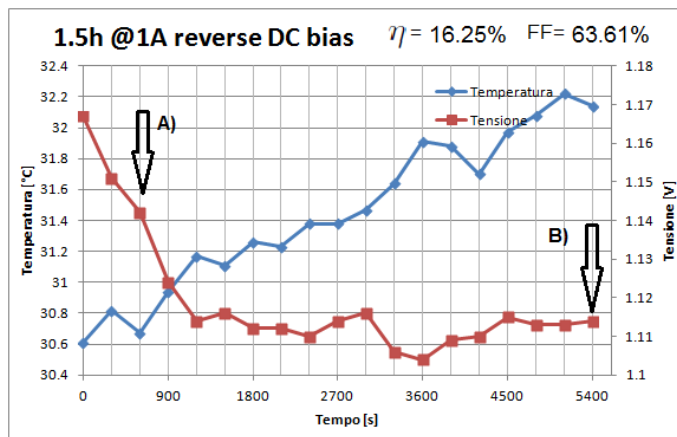


Figure 56: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 1 dello stress in polarizzazione inversa

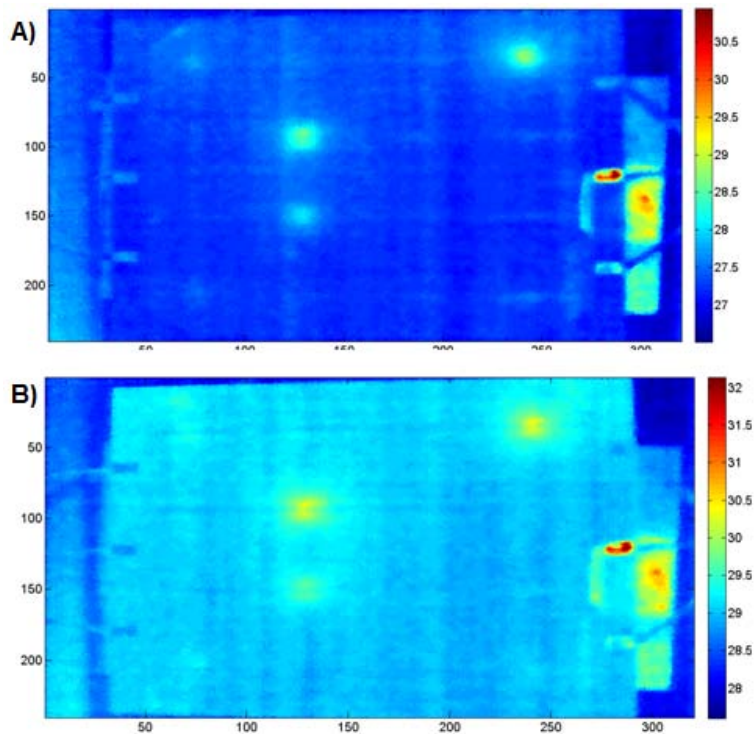


Figure 57: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 56

Step 2: 3h @2A in polarizzazione inversa a corrente continua

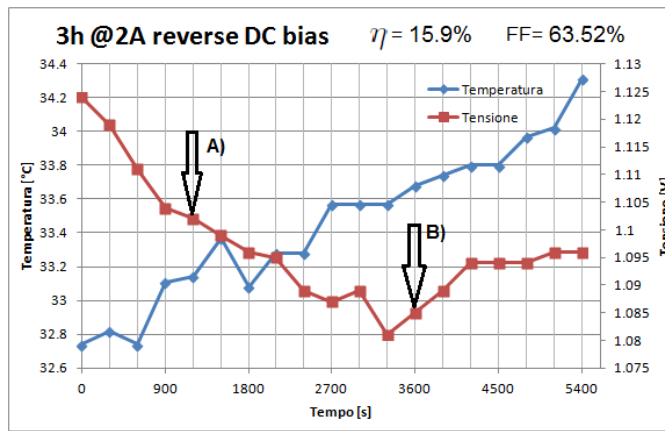


Figure 58: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 2 dello stress in polarizzazione inversa

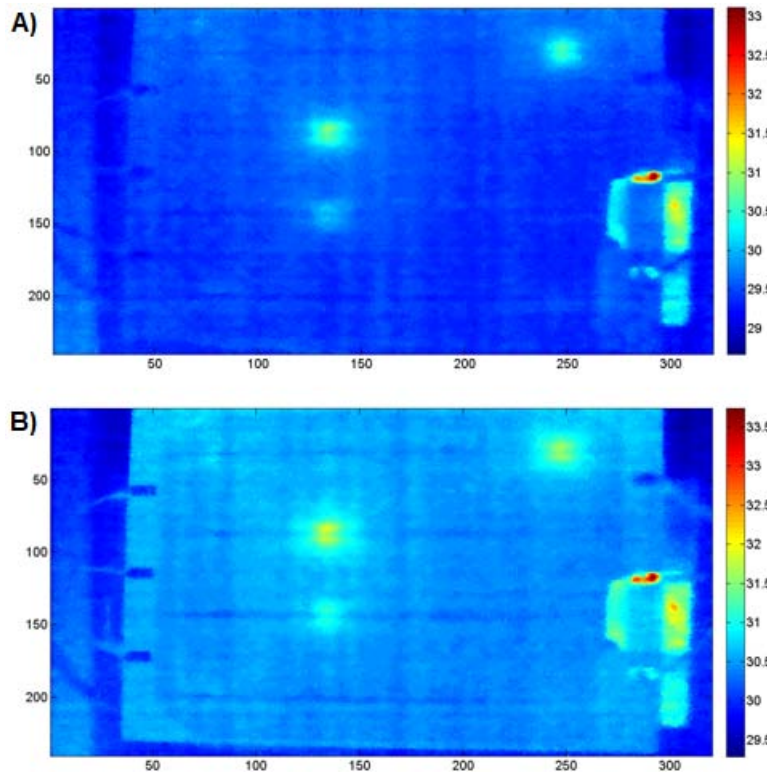


Figure 59: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 58

Step 3: 4.5h @3A in polarizzazione inversa a corrente continua

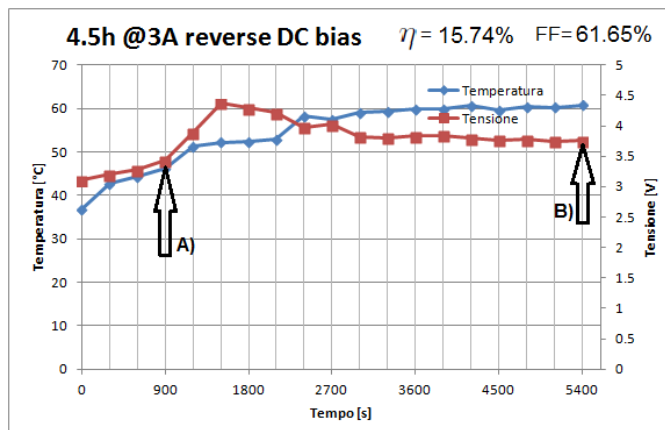


Figure 60: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 3 dello stress in polarizzazione inversa

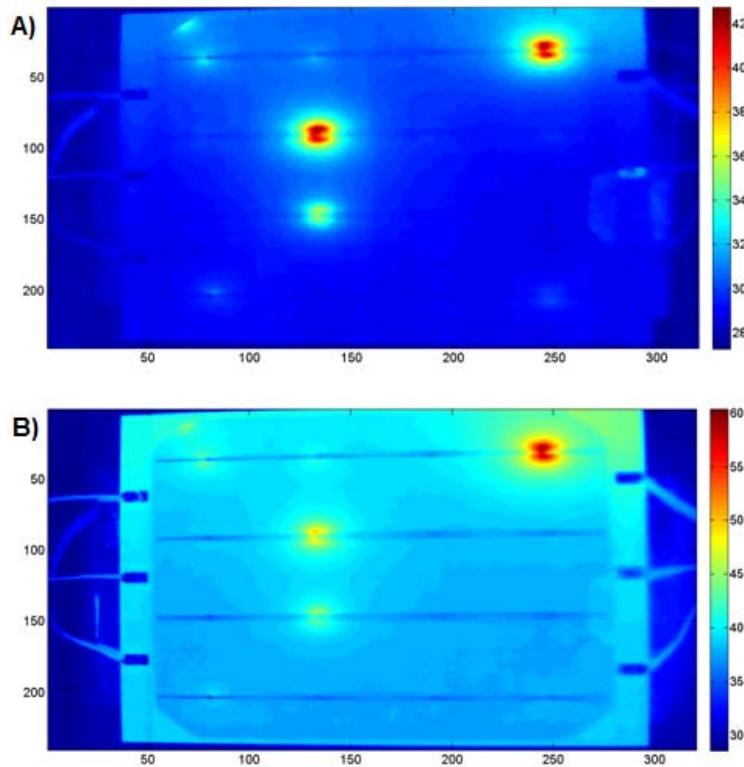


Figure 61: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 60

Step 4: 6h @3.5A in polarizzazione inversa a corrente continua

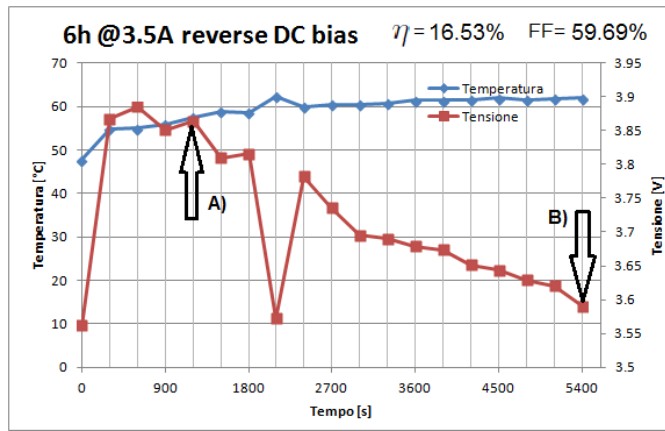


Figure 62: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 4 dello stress in polarizzazione inversa

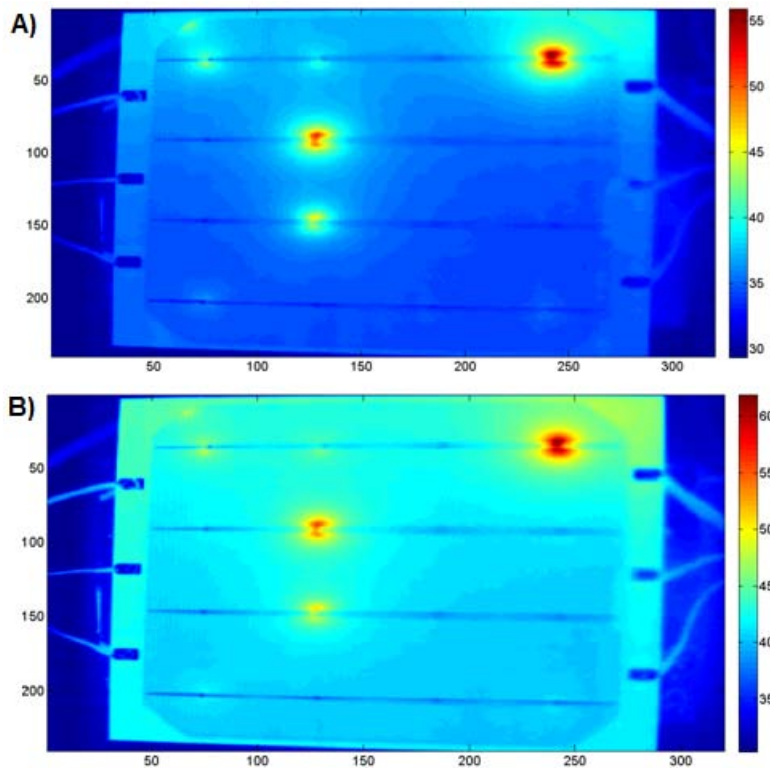


Figure 63: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 62

Step 5: 7.5h @4A in polarizzazione inversa a corrente continua

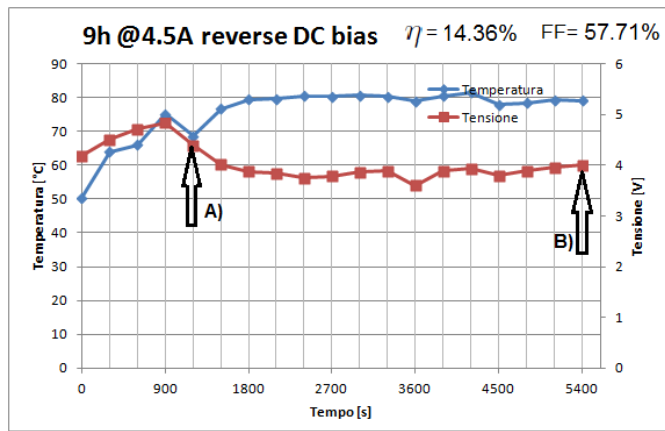


Figure 64: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 5 dello stress in polarizzazione inversa

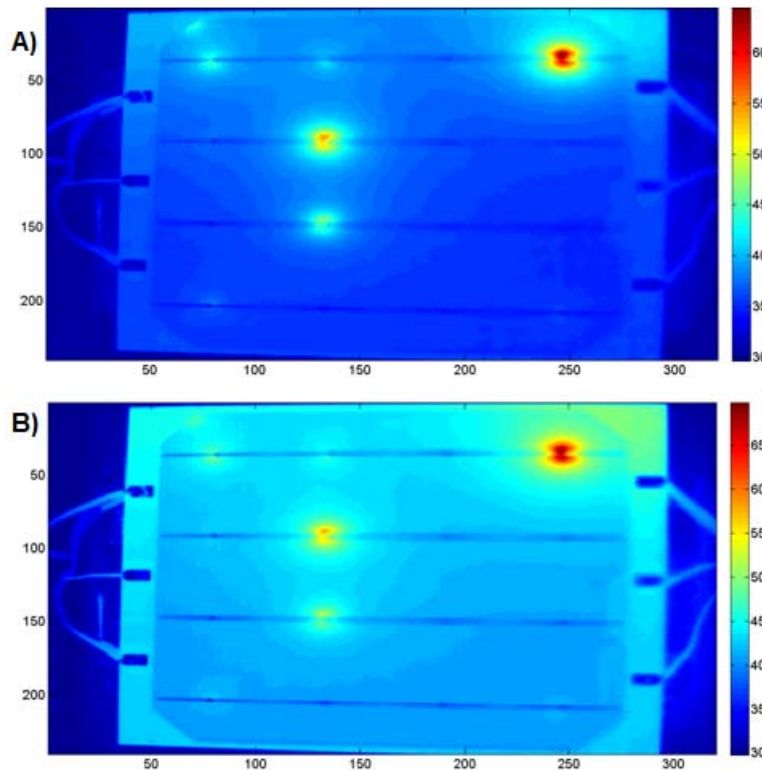


Figure 65: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 64

Step 6: 9h @4.5A in polarizzazione inversa a corrente continua

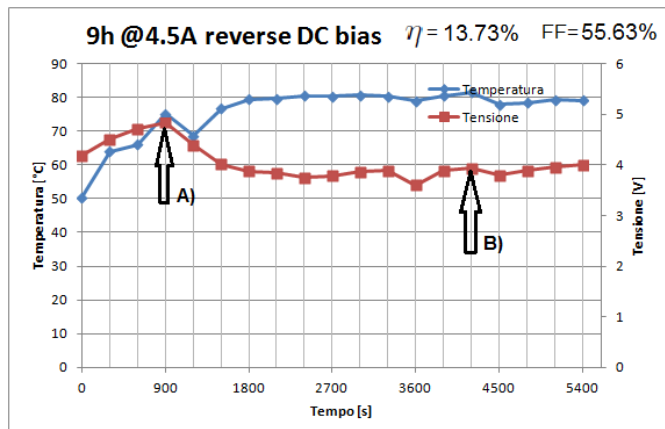


Figure 66: Andamenti di tensione e temperatura massima rilevata durante lo step 6 dello stress in polarizzazione inversa

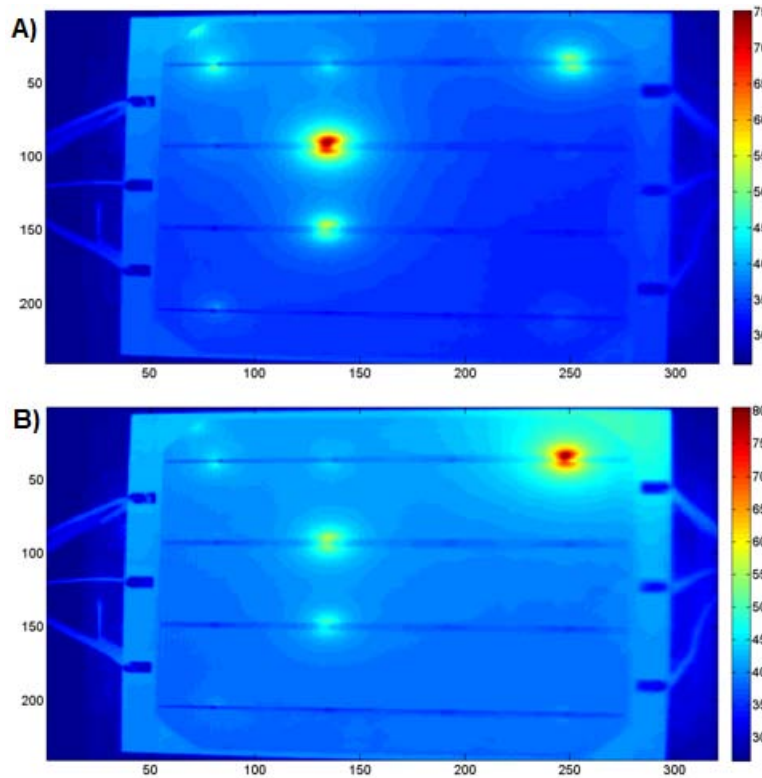


Figure 67: Immagini termografiche della Cella 14 rilevate nei punti indicati in figura 66

3.3 Modelli Matlab per le Celle Solari MWT

Parallelamente alle misure di stress, altri fra i campioni a disposizione sono stati studiati in modo alternativo. Si è deciso infatti di estrapolare alcuni fra i parametri più significativi che descrivono il comportamento di una generica cella solare (ad esempio resistenza serie, resistenza di shunt, parametri caratteristici dei diodi del modello equivalente) tramite il metodo presentato nel paragrafo 2.2 di questa tesi.

Le curve I-V di riferimento per questo processo sono le stesse che sono state acquisite per capire quali fossero le celle con caratteristiche stabili e costanti al variare della posizione di contattatura (scelta descritta nel paragrafo 3.1). Di seguito verranno presentate alcune immagini che comparano la curva ottenuta con tale modello e quella derivata dalle misure sperimentali.

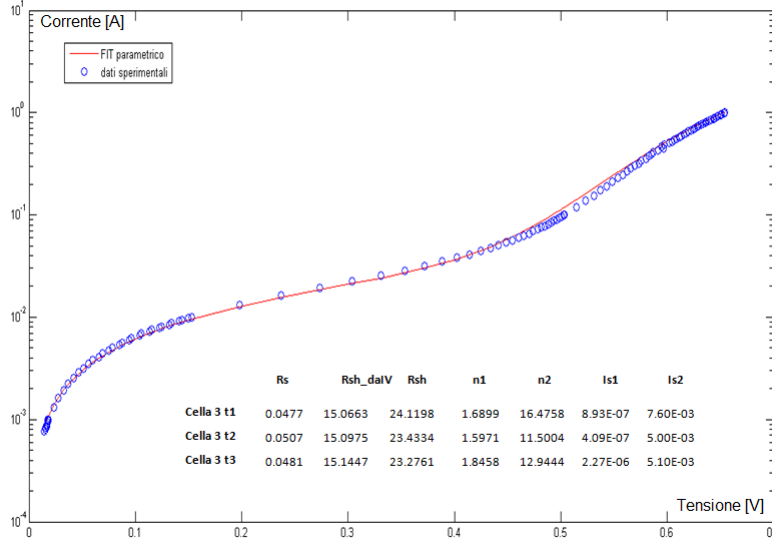


Figure 68: Confronto fra curva I-V ottenuta dalla simulazione e dai dati sperimentali della Cella 3

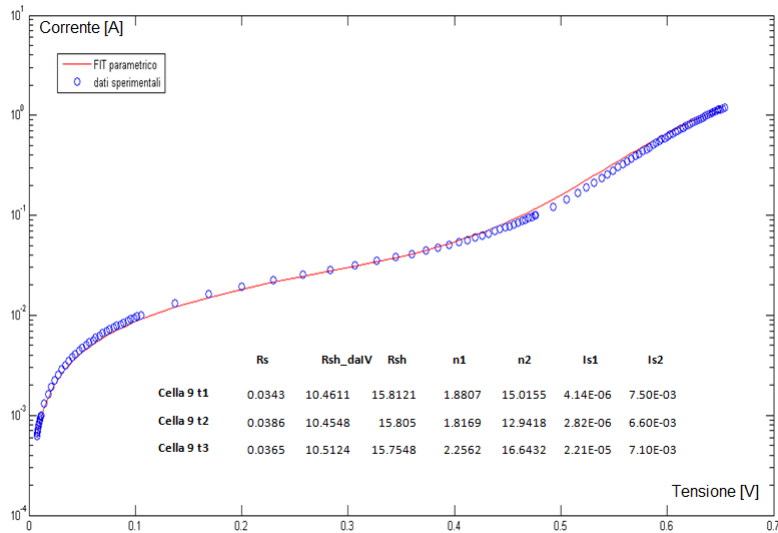


Figure 69: Confronto fra curva I-V ottenuta dalla simulazione e dai dati sperimentali della Cella 9

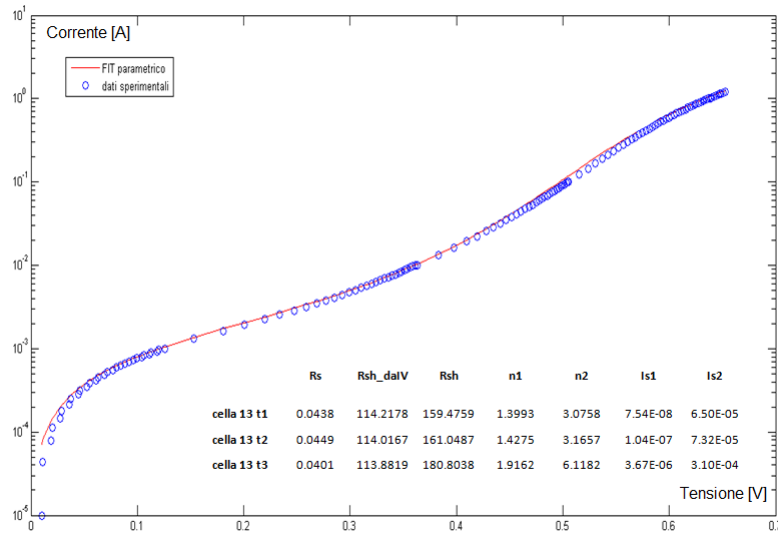


Figure 70: Confronto fra curva I-V ottenuta dalla simulazione e dai dati sperimentali della Cella 13

Come si può vedere, il modello a due diodi rappresenta in maniera molto buona il reale comportamento assunto dalla cella solare, ed infatti la curva rossa segue molto precisamente i dati reali misurati in condizioni di buio.

In ogni immagine, inoltre, sono riportati i parametri ricavati dall'algoritmo di fitting, e sono gli stessi parametri che andrebbero sostituiti nel circuito equivalente presentato nel paragrafo 2.2 per avere un comportamento uguale alla cella in esame. Le celle considerate facevano parte di tre differenti gruppi di campioni, e precisamente sono state fabbricate come segue:

- Cella 3: Implanted, Drill After Implant, SP on Back, No Edge Isolation
- Cella 9: Diffused, Drill After Diffusion, SP on Back, Edge Isolation
- Cella 13: Diffused, Drill Before Diffusion, SP on Back, Edge Isolation

Dai valori ottenuti emerge che la prima caratteristica comune fra queste celle è la bassa resistenza serie fornita dai campioni: essa è dell'ordine delle decine di $m\Omega$ in tutti e tre i casi esaminati; al contrario, per la resistenza di shunt si nota come la Cella 3 e la Cella 9 presentino valori dell'ordine della decina di Ω mentre nella Cella 13 è addirittura di un ordine di grandezza più grande. Bisogna inoltre considerare che queste misure sono state effettuate con la tecnica a 4 terminali, e quindi si basano sulle proprietà dei singoli pin connessi per ottenere la misura: nelle celle che sono state saldate (e su cui è stato eseguito lo step stress) è stata osservata una variazione notevole della resistenza di shunt, probabilmente poichè se la corrente si concentra su più punti della cella, si crea una sorta di effetto "parallelo" che abbassa quindi tale parametro. Il modello elettrico equivalente infatti cerca di descrivere il comportamento generalizzato della cella, ma le nostre misure hanno evidenziato che i meccanismi che si instaurano quando la cella è in funzione non sempre sono equidistribuiti su tutta la superficie del campione (figura 71, sinistra).

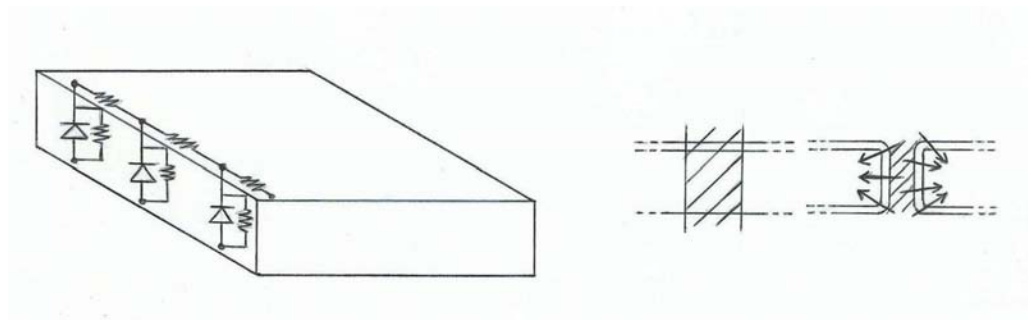


Figure 71: Immagini volte alla spiegazione dei risultati ottenuti dal fit parametrico

Anche la scelta del momento in cui utilizzare il laser nei processi di fabbricazione probabilmente modifica le caratteristiche fisiche, e di conseguenza

quelle elettriche, della cella. Nella parte a destra della figura 71 si è cercato di schematizzare l'effetto dell'utilizzo del laser prima e dopo della diffusione (o dell'impiantazione): per le misure che abbiamo ottenuto, possiamo dire che è specialmente la resistenza di shunt a risentire in maniera rilevante delle tecniche di produzione. Orientativamente, per ottenere una resistenza di shunt con un valore accettabile, è necessario contattare per mezzo del laser prima della diffusione (o dell'impiantazione ionica), ed includere nel processo di produzione l'isolamento dei bordi; tuttavia, siccome sono presenti dei passaggi dove l'operatore può inserire imprecisioni o differenze seppur minime fra una cella e l'altra, la buona riuscita del campione non è assicurata.

3.4 Obiettivi Futuri

Come detto anche in precedenza, il lavoro che è stato svolto in questi mesi ha portato alla luce numerosi fatti interessanti, caratteristiche positive ma anche problemi importanti.

Queste misure vogliono quindi essere un punto di partenza per studi più approfonditi, se le risorse lo permettono, su questa nuova tipologia di cella solare. I punti che non sono ancora totalmente chiari, e su cui a mio parere dovrà essere orientato il lavoro futuro sono i seguenti:

- *modifica/miglioramento del metodo di contattatura*: la contattatura manuale tramite la pasta conduttiva comporta rischi e potenziali errori che dovrebbero essere eliminati o ridotti al minimo; inoltre ogni intervento “umano” all’interno di un processo produttivo spesso automatizzato e ben regolato, introduce una certa variabilità intrinseca che solo con un grande numero di campioni a disposizione potrebbe essere ignorata.
- *revisione dei processi produttivi*: anche questo è un aspetto che va curato e migliorato, poichè è ormai palese che il processo utilizzato per la produzione fisica delle celle determina delle caratteristiche positive o negative che a loro volta vanno ad influenzare il funzionamento elettrico dell’apparecchio.
- *comportamento delle celle al variare della temperatura*: nell’arco di una giornata, una cella solare può subire parecchi gradi di escursione termica. Le misure al variare della temperatura, combinate magari con delle simulazioni basate sul modello a due diodi, potrebbero fornire ulteriori informazioni sul modo di funzionamento e sui processi che si instaurano all’interno di tali dispositivi.

4 Ringraziamenti

thx u all

universitari specialistica

universitari triennale

amici di rugby

amici dell'aula studio

amici del calcio balilla

genitori e famiglia

marco barbato e matteo meneghini e gaudenzio meneghesso e enrico zanoni

Riferimenti bibliografici

- [1] D. L. Pulfrey, "Photovoltaic Power Generation"
- [2] L. D. Partain, "Solar Cells and their Applications"
- [3] T. Fellmeth, A. Drews, B. Thaidigsmann, S. Mach, A. Wolf, F. Clement, D. Biro, R. Preu, "Industrially feasible all side passivated silicon based c-MWT concentrator solar cells"
- [4] Hsin-Hsin Hsieh, Wen-Kuei Lee, Fu-Ming Lin, Der-Ching Wu, "Performance of Metal Wrapped Through solar module"
- [5] D. Biro, B. Thaidigsmann, F. Clement, A. Wolf, E. Lohmuller, S. Mack, T. Fellmeth, A. Drews, A. Spribille, E. A. Wotke, F. Lottspeich, M. Hofmann, U. Jager, R. Preu, "MWT meets PERC: towards 20% efficient industrial silicon solar cells"
- [6] Weiwei Yin, Xusheng Wang, Feng Zhang, Lingjun Zhang, "19.6% Cast Mono-MWT Solar Cells and 268 W Modules"
- [7] Kyumin Lee, Jong-Keun Lim, Sang-Kyun Kim, In-Sik Moon, Jae-Won Seo, Won-Jae Lee, Eun-Chel Cho, "Impact of laser hole drilling on the breakage rate of multicrystalline silicon wafers"
- [8] Sung-Yu Chen, Bing-Cyun Chen, Chao-Ping Huang, Der-Chin Wu, Chen-Hsun Du, Wen-Haw Lu, Chern-Lin Chen, Hsiand-Ming Hsueh, Yu-Cheng Lin, I-Hsuan Su, "The comparison of MWT solar cell fabrication by two novel and stable approaches"
- [9] Sung-Yu Chen, Chao-Ping Huang, Bing-Cyun Chen, Der-Chin Wu, Wei-Chih Hsu, Chen-Hsun Du, "New printing pattern design and processing of MWT solar cells for plot-line"
- [10] N. Merchant, H. Jiang, A. Shaikh, E. Graddy, D. Zhang, "Screen-printed reflector pastes for back passivated crystalline silicon solar cells"