POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Metrologia di superfici funzionali per la caratterizzazione di celle fotovoltaiche

Original
Metrologia di superfici funzionali per la caratterizzazione di celle fotovoltaiche / Valentina, Furin; Gian Bartolo, Picotto; Ribotta, Luigi. - (2019). (Intervento presentato al convegno A&T - Automation & Testing - LA FIERA DEDICATA A INDUSTRIA 4.0, MISURE E PROVE, ROBOTICA, TECNOLOGIE INNOVATIVE).

Availability:
This version is available at: 11583/2731315 since: 2019-09-19T14:16:16Z

Publisher:
A&T

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

17 April 2024

Metrologia di superfici funzionali per la caratterizzazione di celle fotovoltaiche

Valentina Furin (Ingegnere di Processo[1]) Valentina_Furin@amat.com, Gian Bartolo Picotto (Primo Ricercatore[2]) g.picotto@inrim.it, Luigi Ribotta (Assegnista di Ricerca[2]) l.ribotta@inrim.it

[1] *Applied Materials Italia s.r.l. (AMAT), via Postumia Ovest 244, 31048 Treviso, Italy*

[2] *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), Strada delle Cacce 91, 10135, Torino*

Sessione: Misure

Riassunto breve

Nella fabbricazione delle celle fotovoltaiche i contatti elettrici vengono stampati su wafer di silicio mediante tecniche di *screen-printing* ad elevato *throughput* (fino a 5500 wafer/h). La realizzazione di questi contatti deve essere ottimizzata per contenere i costi dovuti al consumo della pasta d'argento e per limitare gli effetti di ombreggiatura dell'area attiva esposta alla luce solare, e quindi per migliorare l'efficienza della cella. Per queste ragioni i *finger*, contatti elettrici con larghezze di circa 30 µm stampati su celle fotovoltaiche in uno schema a griglia e connessi a tratti più larghi (*busbar*), devono avere basse perdite resistive per evitare il riscaldamento locale del contatto.

La morfologia 3D locale dei *finger* è stata ricostruita mediante l'uso di un microscopio confocale, con il quale sono stati determinati (i) i parametri di rugosità della superficie esposta del *finger*, (ii) l'area locale della sezione trapezoidale del *finger* e (iii) le variazioni dell'area lungo il tratto selezionato attraverso un nuovo parametro di ondulazione del profilo dell'area. Ciò ha permesso di calcolare indirettamente la resistenza elettrica del tratto osservato assumendo un valore dato della resistività della pasta d'argento. I valori ottenuti sono risultati in ottimo accordo con la resistenza del tratto misurata direttamente utilizzando un set-up *4-wire like,* assumendo che il finger sia omogeneo per tratti di analoga lunghezza. Il modello assunto ha permesso di verificare che la resistenza parallelo del semiconduttore risulta trascurabile. La misura è stata ripetuta su *finger* tratti da celle di tipologia differente e diverso layout, ottenendo sempre un buon accordo tra i valori calcolati e misurati.

Lo studio ha dimostrato che è possibile determinare alcune caratteristiche di conduttori stampati mediante misure non a contatto, le quali in prospettiva potranno trovare applicazione per controlli *next-to-line*/*in-line* nel processo produttivo delle celle fotovoltaiche.

Riassunto esteso

1. Breve presentazione del gruppo di lavoro

Applied Materials Italia opera nello sviluppo di tecnologie di produzione delle celle fotovoltaiche con *hardware*, *software*, materiali di consumo e processi qualificati che consentono di migliorare l'efficienza delle celle prodotte [1].

Il gruppo INRiM si occupa di metrologia delle superfici alla nano- e micro-scala utilizzando strumentazione con e senza contatto, quali un microscopio interferometrico/confocale e un profilometro a stilo alla microscala, un microscopio a forza atomica metrologico ed un diffrattometro ottico alla nanoscala.

Negli ultimi anni, la ricerca si è focalizzata sulla metrologia delle superfici funzionali, più nello specifico per determinare la correlazione tra i parametri morfologici e i parametri legati alla loro funzionalità.

2. *Illustrazione dello studio*

L'efficienza di una cella fotovoltaica (o cella PV, dall'inglese *photovoltaic cell*) dipende fortemente dalla qualità di stampa dei contatti elettrici *(finger)* su wafer di silicio. Siccome per il 2025 è stimata una produzione di 8000 celle per ora [2] con *finger* con larghezze sempre minori, lo studio della correlazione tra proprietà morfologiche e funzionali di questi ultimi è necessario in quanto l'efficienza della cella dipende anche dalla capacità di trasporto delle cariche da parte dei contatti elettrici (e quindi dalla loro resistenza).

In questo lavoro è illustrato un metodo di misura della morfologia dei *finger* [3] correlata alla loro resistenza di linea. Questo metodo, sviluppato nell'ottica di applicazioni *next-to-line* nel processo produttivo, può ridurre significativamente tempi e costi dei controlli *off-line*. Infatti, a differenza delle misure di resistenza a contatto, la misura ottica è una tecnica non contatto grazie alla quale si può riuscire a studiare velocemente i *finger* difettati. Con l'analisi morfologica, inoltre, è possibile identificare la presenza di difetti locali, quali restringimenti e/o interruzioni, attraverso l'analisi di parametri topografici.

3. *Soluzioni e metodi adottati*

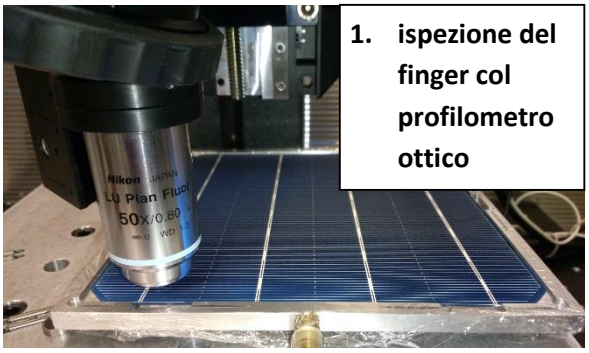
Le misure morfologiche sono state effettuate utilizzando un profilometro ottico in modalità confocale di intensità con un obiettivo confocale 50x. Lo strumento opera su una tavola antivibrante. Le immagini 3D dei segmenti di *finger*, ottenute dal mosaico di immagini locali riprese in sequenza lungo il tratto in esame, sono state processate mediante l'uso di *software* dedicati alla metrologia delle superfici (MountainsMap, SPIP). Mediante l'uso di questi software si è ricostruita quantitativamente la morfologia locale del *finger* (finitura, rugosità, altezza ed area della sezione quasi-trapezoidale); da quest'ultima si ottiene la resistenza (*Figura 1*) nota la resistività del materiale.

Le misure di resistenza sono state effettuate utilizzando una configurazione *4-wire like* (*Figura 2*). In questo *set-up* sperimentale, una punta metallica contatta un *busbar* ed è collegata ai connettori Low Sense e Low Input del multimetro, mentre l'altra contatta il *finger* in esame ed è collegata ai connettori High Sense e High Input del multimetro. Il vantaggio di questa configurazione sperimentale è quello di permettere misure più accurate per valori di bassa resistenza, poiché gli elettrodi di corrente e di tensione sono separati, minimizzando l'effetto della resistenza di contatto.

Per poter risalire alla posizione esatta del *finger* analizzato con le diverse tecniche, e quindi poter garantire la riferibilità delle misure, la cella è stata posizionata su un supporto *ad-hoc* (*universal sample substrate fixture,* USSF) [4], dotato di supporti cinematici in grado di garantire un sistema di coordinate assoluto con una ripetibilità di riposizionamento laterale entro poche decine di micrometri.

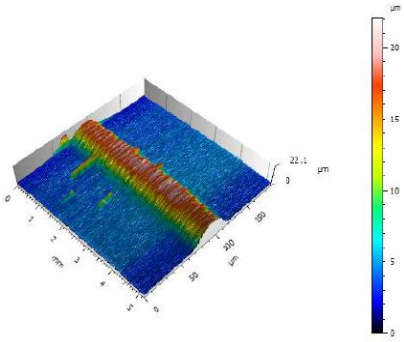
4. *Presentazione dei risultati ottenuti*

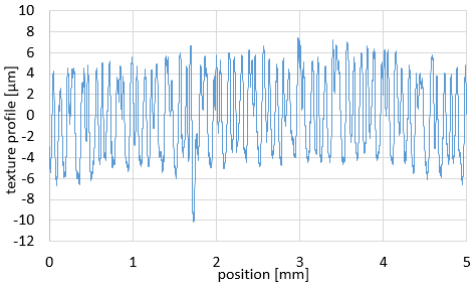
Lo studio è stato condotto su celle di diverso layout [5] prodotte da Applied Materials Italia, più nello specifico su celle *p-type*, su celle a eterogiunzione *n-type* bifacciali e su *test pattern* con *finger* di diversa ampiezza stampati su un supporto ceramico. Per tutti questi è stata svolta un'analisi morfologica come descritto nei diversi passaggi riportati in *Figura 1*.

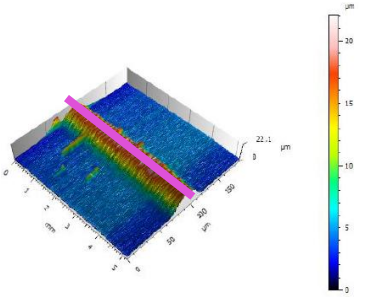


1. ispezione del finger col profilometro ottico

2. ricostruzione 3D topografica



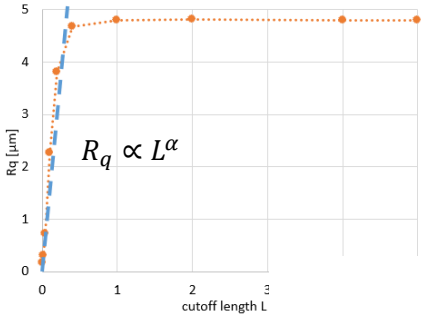


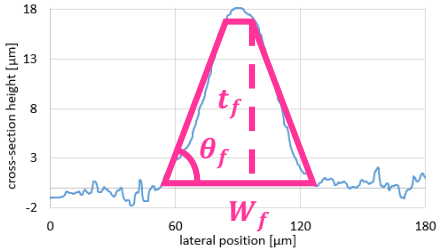


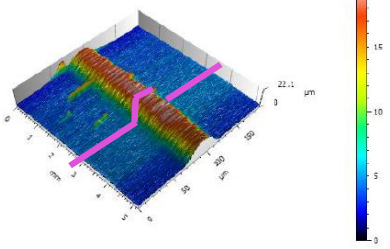
3. estrazione del profilo sulla sommità del finger

parametri di rugosità del profilo della sommità del finger:

R_z (picco massimo), R_a (parametro medio), R_q (parametro quadratico medio), parametro frattale F, fattore di scalamento α

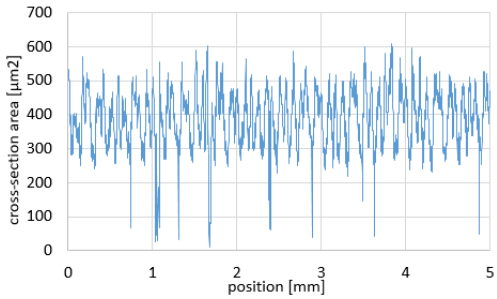






4. estrazione della sezione trasversale del finger

area della sezione trasversale $A_i = \left(W_f - \frac{t_f}{\tan\theta_f}\right) t_f$



parametri di ondulazione del profilo della variazione dell'area della sezione trasversale lungo il finger:

$W_A t$ (valore assoluto massimo), $W_A sk$ (simmetria), $W_A ku$ (curtosi)

Figura 1 Analisi morfologica effettuata sui fingers delle celle fotovoltaiche.

Innanzitutto, il *finger* da analizzare col profilometro ottico (passaggio 1) viene scelto dopo aver esaminato la cella PV con un oculare d'ingrandimento oppure dopo aver esaminato la sua immagine di elettroluminescenza (EL). Quest'ultima è ottenuta mediante l'uso di una telecamera a raggi infrarossi (IR) che registra l'emissione IR dovuta al passaggio di corrente all'interno della cella PV (tenuto fisso il voltaggio). Solitamente, nel processo produttivo vengono analizzati *finger* che presentano dei difetti, identificati dalle variazioni del colore nell'immagine EL, ma nel nostro studio abbiamo anche analizzato *finger* senza difetti, per poter validare il modello da noi sviluppato di correlazione tra i valori di resistenza direttamente misurati e i valori di resistenza calcolati dalla morfologia 3D ottenuta dalla misura ottica confocale.

La ricostruzione topografica del tratto di *finger* in esame (passaggio 2) inizia dal mosaico di immagini riprese in sequenza, e l'immagine ottenuta viene processata con *software* metrologici. Una prima analisi consiste nell'estrarre un profilo lungo la sommità del *finger* (passaggio 3), sul quale si determinano i parametri di rugosità R_z, R_a ed R_q. Inoltre, vengono studiati il fattore di scalamento (α) del parametro R_q, dato dal *trend* lineare del grafico log R_q – log L, e il parametro frattale F, che descrive la complessità della superficie.

Il passaggio 4 riguarda invece il calcolo dell'area della sezione trasversale, secondo la formula riportata in *Figura 1* [6], lungo tutta la lunghezza dove il *finger* è stato campionato. In questo modo si ottiene un profilo della variazione dell'area della sezione trasversale lungo il *finger*, e vengono calcolati i parametri W_At (valore assoluto massimo), W_Ask (simmetria) e W_Aku (curtosi), da noi sviluppati. Attraverso l'analisi di questi parametri si può identificare la presenza di difetti, e in *Tabella 1* sono riportati valori caratteristici di parametri morfologici per *finger* non difettati.

Tabella 1 Parametri morfologici per finger non difettati in celle PV

PARAMETRI MORFOLOGICI	**VALORI**
$\boldsymbol{R_a}$ [µm]	~ 1.0
$\boldsymbol{R_q}$ [µm]	~ 4.0
$\boldsymbol{R_z}$ [µm]	6.0 – 9.0
$\boldsymbol{\alpha}$	~ 0.5
$\boldsymbol{F}$	~ 1.5
$\boldsymbol{W_At}$ [µm^2]	5.0 – 20.0
$\boldsymbol{W_Ask}$	0.0 – 2.0
$\boldsymbol{W_Aku}$	2.5 – 5.5

In *Figura 2* è riportata la correlazione tra analisi morfologica e funzionale sui *finger* delle celle fotovoltaiche. Dopo aver calcolato l'area puntuale della sezione trasversale come spiegato sopra, la resistenza puntuale viene calcolata usando la seconda legge di Ohm, mentre la resistenza totale è data dalla somma delle resistenze puntuali lungo tutta la lunghezza del *finger* analizzato. Questa resistenza calcolata viene confrontata con la resistenza di linea misurata, che viene modellizzata secondo quanto riportato in *Figura 2*. I risultati sperimentali effettuati su celle con layout diversi confermano la validità del modello, mostrando un buon livello di accordo tra resistenza misurata e resistenza calcolata, con l'assunzione che il *finger* sia omogeneo per tratti di analoga lunghezza. Il modello assunto ha permesso di verificare che la resistenza parallelo del semiconduttore risulta trascurabile, e ciò è stato confermato dalle misure condotte sui *test pattern* stampati su supporti ceramici.

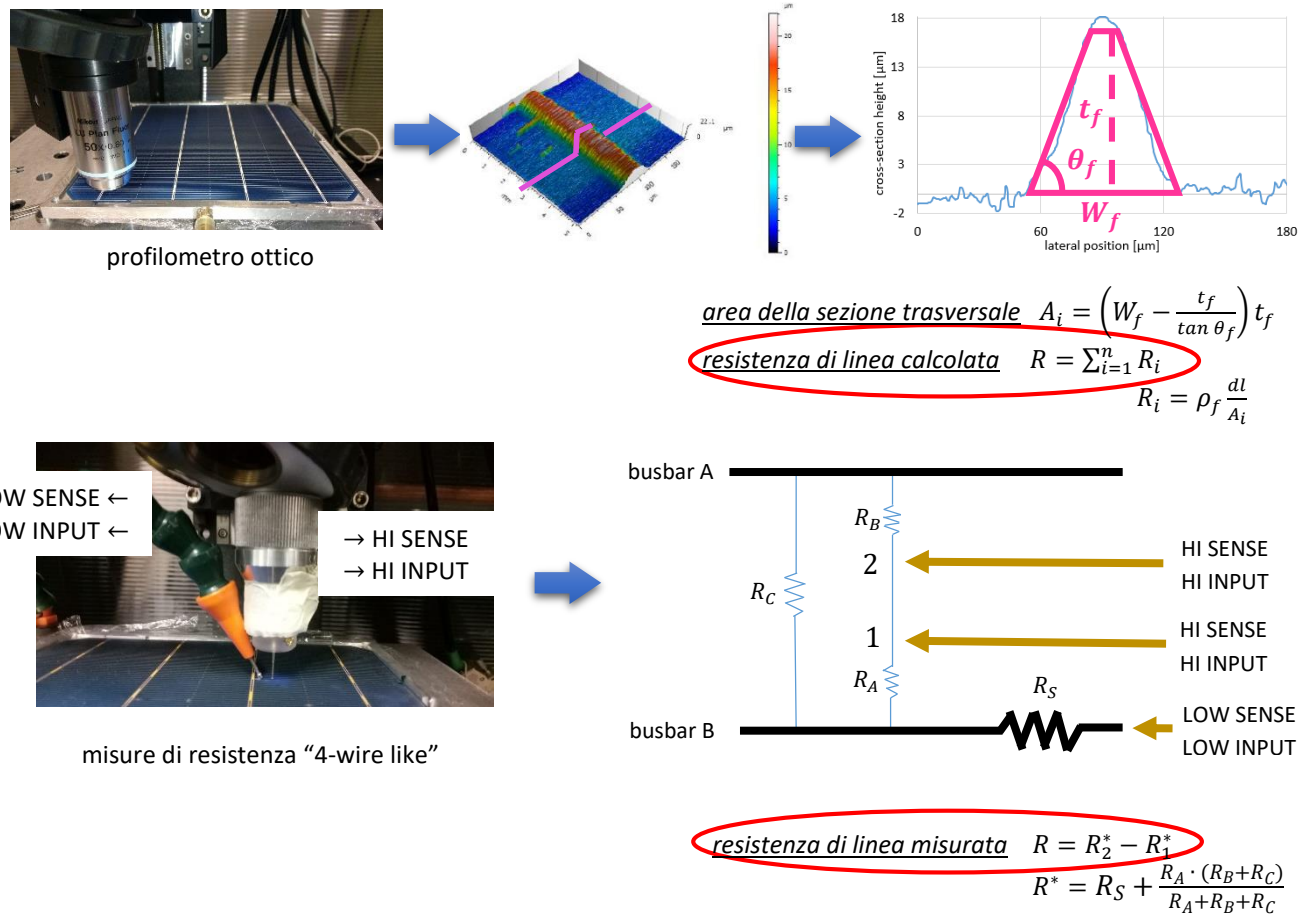


Figura 2 Correlazione tra analisi morfologica e funzionale sui fingers delle celle fotovoltaiche. La resistenza di linea misurata direttamente col metodo “4-wire like” può essere calcolata indirettamente mediante analisi morfologica.

5. *Possibili estensioni applicative del progetto*

In *Figura* 3 è riportato il processo complessivo di produzione di moduli solari, e come il metodo di correlazione tra analisi morfologica e funzionale possa essere utilizzato per effettuare un controllo *next-to-line* nel processo di produzione di celle PV. Nella produzione dei contatti elettrici, le aziende stampano *busbar* e i *finger* su wafer di silicio, ottenuti da lingotti di silicio monocristallino comunemente cresciuti col metodo Czochralski [7]. Le celle fotovoltaiche appena prodotte vengono sottoposte ad un controllo in linea mediante un’analisi EL, grazie alla quale vengono scelte le celle che potranno essere installate in un modulo solare. Il test EL è superato se i difetti per cella sono minori di 10 (in questo modo non si hanno perdite di efficienza della cella PV); se questi difetti sono più di 10, il test risulta fallito e bisogna procedere con un controllo *next-to-line*. Quest’ultimo risulta superato se (i) i difetti sono restringimenti, (ii) la deviazione tra la resistenza calcolata e misurata è minore del 15 % e (iii) i parametri morfologici soddisfano i criteri riportati in *Tabella 1*; se i difetti sono vere e proprie interruzioni e non soddisfano i requisiti elencati in precedenza, allora la cella PV è scartata.

Lo stesso studio riportato in questo abstract può essere applicato ad altri substrati prodotti mediante tecniche di stampa ad alto volume di produzione, come conduttori elettrici o led stampati su supporti flessibili plastici mediante tecniche *screen-printing* e *flexo-printing* [8].

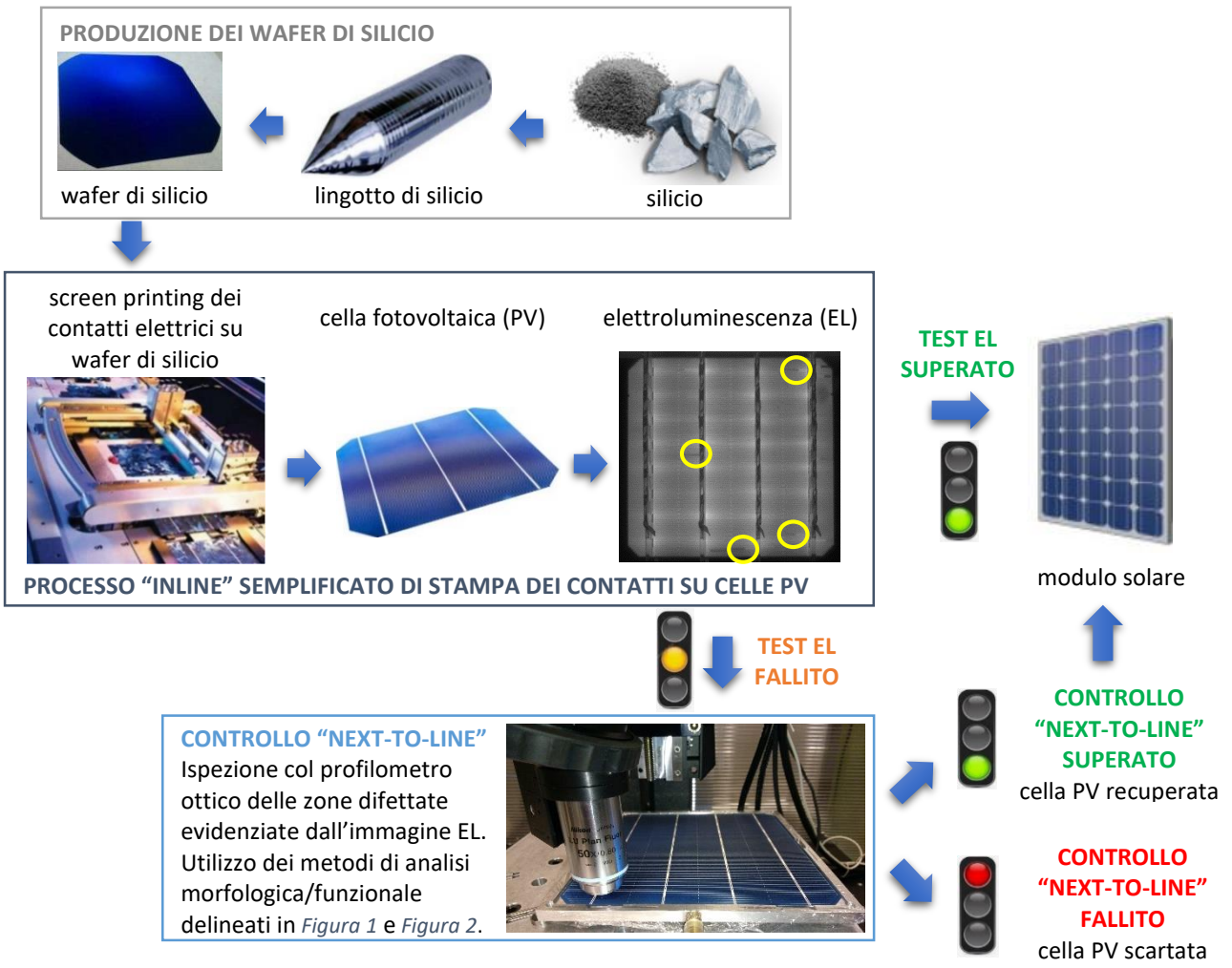


Figura 3 Possibile applicazione industriale del metodo di correlazione tra analisi morfologica e funzionale nel processo di produzione di moduli solari.

Riferimenti bibliografici

[1] http://www.appliedmaterials.com/products/applied-baccini-esatto-technology

[2] International Technology Roadmap for Photovoltaic ITRPV 9th edition 2018 – report release and key findings, Markus Fischer, PV CellTech Conference, 14 March 2018, Penang, Malaysa

[3] Roberto Bellotti, Valentina Furin, Claire Maras, Gian Bartolo Picotto, Luigi Ribotta, A function-driven characterization of printed conductors on PV cells, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 6 (2018) 025002

[4] Christopher Jones, Marco Santiano, Stephen Downes, Roberto Bellotti, Daniel O'Connor, Gian Bartolo Picotto, A universal substrate sample fixture for efficient multi-instrument inspection of large, flexible substrates, with absolute position registration support, *Proc. euspen 16th Intl. Conf.*, Nottingham, 30 May – 3 June 2016

[5] Roberto Bellotti, Valentina Furin, Alessandro Marsura, Gian Bartolo Picotto, Luigi Ribotta, Morphology-driven parameters on photovoltaic cells electric contacts, in preparazione

[6] Lin Jiang, Weiming Zhang, Tracy Guo, David Kapp, Li Yan, Larry Wang, An improved mathematical modelling to simulate metallization screen pattern trend for silicon solar cell, *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)*, 2013, 2641–2645

[7] Jan Czochralski, "Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle" [A new method for the measurement of the crystallization rate of metals], *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1918, 92, 219–221.

[8] Roberto Bellotti, Claire Maras, Gian Bartolo Picotto, Marco Pometto, Luigi Ribotta, 3D characterization of printed structures by stylus- and optical-based measurements, *Proc. euspen 18th Intl. Conf.*, Venice, 04 – 08 June 2018, 493-494