

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SEDE DI CESENA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA E DELLE
TELECOMUNICAZIONI**

TITOLO DELL'ELABORATO

**Tecniche di light trapping per celle in silicio
cristallino**

Elaborato in

Elettronica L-A

Relatore
Prof. Enrico Sangiorgi
Correlatore
Ing. Mauro Zanucoli

Presentata da
Claudia Patella

Sessione I
Anno Accademico 2011/2012

Keywords

Celle in silicio cristallino

Riflettanza

Testurizzazione

Light trapping

Sommario

Introduzione	5
1 Introduzione alla conversione fotovoltaica e principali figure di merito delle celle solari	8
1.1 CONVERSIONE FOTOVOLTAICA	8
1.2 CELLE SOLARI IN SILICIO	9
1.3 PARAMETRI E FIGURE DI MERITO DELLE CELLE SOLARI	10
1.3.1 INDICE DI RIFRAZIONE	10
1.3.2 RIFLESSIONE	11
1.3.3 ASSORBIMENTO	12
1.3.4 TRASMISSIONE	14
1.3.5 CORRENTE DI CORTO CIRCUITO E DENSITA' DI CORRENTE DI CORTO CIRCUITO	14
1.3.6 TENSIONE DI CIRCUITO APERTO	18
1.3.7 FILL FACTOR	19
1.3.8 EFFICIENZA E QUANTUM EFFICIENCY	21
1.3.8.1 EQE e IQE	23
1.4 STATO DELL'ARTE DELLE CELLE IN SILICIO CRISTALLINO	24
1.5 COSTI, VENDITE E PREVISIONI DEL PV	29
2 Tecniche di intrappolamento delle radiazioni in celle solari con wafer di silicio cristallino	31
2.1 ANTIREFLECTION COATING (ARC)	31
2.2 PASSIVAZIONE DELLA SUPERFICIE POSTERIORE (REAR SURFACE)	35
2.3 TEXTURING PER CELLE "THICK WAFER" IN c-Si	37
2.3.1 LAMBERTIAN REFLECTOR	39
2.3.2 GEOMETRICAL LIGHT TRAPPING	42
2.3.2.1 GEOMETRIE BIDIMENSIONALI: V-GROOVE	42
2.3.2.2 GEOMETRIE TRIDIMENSIONALI: PYRAMIDS, TILER'S PATTERN, PERPENDICULAR GROOVES	48
2.4 LIGHT TRAPPING IN ENCAPSULATION	53
2.5 ANALISI SPERIMENTALE E TEORICA DI UNA CELLA TESTURIZZATA IN SILICIO MONOCRISTALLINO	54

2.6	PROCESSI DI FABBRICAZIONE DELLE TEXTURE 3-D: KOH E TMAH ETCHING	60
3	Simulazioni e analisi di strutture light trapping per celle solari in silicio cristallino.....	63
3.1	RISORSE DI CALCOLO PER LA RISOLUZIONE DELLE EQUAZIONI DI MAXWELL.....	63
3.1.1	FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)	63
3.1.2	TRANSFER-MATRIX METHOD (TMM).....	64
3.1.3	RIGOROUS COUPLED-WAVE ANALYSIS (RCWA).....	64
3.1.4	RAYTRACER (RT)	65
3.2	SIMULAZIONI DI TEXTURE APPLICATE A CELLE IN SILICIO MONO CRISTALLINO.....	66
3.2.1	SUPERFICI PIANE SPECULARI.....	67
3.2.2	TEXTURE V-GROOVE	69
3.2.3	TEXTURE A PIRAMIDI	72
3.2.4	CONFRONTO DELLE CURVE DI REFLECTANCE.....	76
3.2.5	CONFRONTO DEI VALORI DI DENSITA' DI CORRENTE FOTOGENERATA	77
	Conclusioni	80
	BIBLIOGRAFIA	82
	INDICE DELLE FIGURE	84
	INDICE DELLE TABELLE	88
	Ringraziamenti	93

Introduzione

In un scenario economico e strategico nel quale si cerca sempre più di ridurre lo spreco di risorse naturali, il fotovoltaico apre nuove promettenti prospettive che consentiranno l'utilizzo di una sorgente energetica illimitata come il sole.

Una vera e propria rivoluzione che viene portata avanti da oltre mezzo secolo. Il fotovoltaico è una tecnologia sostenibile, alla quale sarà sempre più difficile rinunciare se l'obiettivo dei prossimi anni sarà quello di ridurre la dipendenza energetica dalle fonti cosiddette convenzionali. Le motivazioni del successo della conversione fotovoltaica però sono anche altre e di carattere più strettamente tecnico: al di là dei costi, che con i meccanismi incentivanti diventano maggiormente sostenibili, gli impianti fotovoltaici sono semplici, affidabili, praticamente privi di manutenzione e soprattutto possono essere collocati ovunque ci sia irradiazione solare. Un aspetto di forte interesse, è che l'energia elettrica prodotta con il sole non viene mai sprecata a prescindere dall'uso che se ne fa localmente, anzi quella in eccesso può poi essere rivenduta alle grandi compagnie fornitrici di energia [1].

Siamo tutti a conoscenza del fatto che il Sole sia la risorsa più importante che la Terra può sfruttare, in quanto non esisteremmo senza di esso: il cibo che mangiamo, l'acqua che beviamo, tutto sulla Terra dipende dal Sole. Ed essendo questo sorgente di vita, perché non trarre vantaggio anche dall'energia che esso irradia verso di noi attraverso i fotoni?

Per tale motivo il presente lavoro ha come oggetto la trattazione delle tecniche di miglioramento delle caratteristiche di assorbimento della radiazione solare da parte dei dispositivi fotovoltaici.

È di rilevante importanza enunciare le principali tecnologie fotovoltaiche in commercio, in quanto talune sono commercialmente più richieste rispetto ad altre, a causa delle diverse efficienze che possono offrire e dei relativi costi da sostenere.

Correntemente il mercato è dominato da moduli fotovoltaici in silicio monocristallino (o silicio cristallino, c-Si), il quale viene prodotto soprattutto attraverso il processo *Czochralski*, che permette di ottenere la crescita di monocristalli di estrema purezza, migliorando quindi le prestazioni delle celle, ma in pani di forma cilindrica, che non consentono una copertura ottimale per un modulo fotovoltaico rettangolare, con il conseguente spreco di materiale e spazio.

Il silicio policristallino è certamente più economico del precedente, perché possiede caratteristiche fisiche meno pure rispetto al c-Si e viene prodotto da

lingotti rettangolari, quindi facilmente adattabili ai pannelli fotovoltaici. Purtroppo l'efficienza è inferiore.

Dal policristallino deriva il silicio a nastro (*ribbon silicon*), creato in film sottile di silicio fuso: non necessita di tagli da lingotti, quindi vi è un notevole risparmio dovuto alla riduzione di rifiuti del materiale ma, essendo di qualità inferiore, le prestazioni della cella diminuiscono.

Infine il silicio *mono-like multi* è una delle tecnologie più recenti, introdotta commercialmente attorno al 2009, è caratterizzata da colate di silicio policristallino con piccoli "semi" di silicio monocristallino. La sezione interna possiede quindi un'efficienza molto alta, mentre i bordi esterni mantengono i parametri meno efficaci del silicio policristallino. Il risultato è una linea che produce celle simili alle c-Si ma a prezzi inferiori.

Un'ottima alternativa alle normali celle in silicio, è quella di produrle in film sottili (*thin-film*), cercando però di mantenere performance ragionevoli. Questa tecnologia riduce la quantità di materiale richiesto per la creazione della cella, e la maggior parte delle celle a film sottile sono ricoperte da due lastre di vetro. Le celle a film sottile sono meno costose delle celle in wafer di silicio, infatti, unitamente all'utilizzo di un minor volume di materiale di per se più economico, il materiale assorbente può essere depositato con processi a bassa temperatura, su ceramica, vetro e substrati flessibili, in pannelli di superficie relativamente più elevata di quelli basati su wafer, conferendo in tal modo una buona robustezza meccanica. L'utilizzo di tali substrati consente un'ottima integrazione architettonica a livello di edificio; questi fattori hanno determinato un forte e crescente interesse verso i dispositivi a film sottile, soprattutto laddove possono essere sfruttate grandi aree (es. tetti di capannoni commerciali ed industriali, coperture di parcheggi ed impianti sportivi) oppure dove i requisiti di integrazione architettonica sono particolarmente stringenti (es. arredo urbano, edifici di interesse estetico, ecc.).

La tecnologia a film sottile è spesso creata con diversi materiali, quali il tellururo di cadmio (CdTe), seleniuro di indio rame gallio (CIGS) e silicio amorfo (a-Si). La prima rappresenta la tecnologia più competitiva, in quanto il suo punto di forza è dato dai bassi costi, minori del 30% rispetto al CIGS e del 40% rispetto all'a-Si.

Un parametro di rilevante importanza per la commercializzazione di una tecnologia fotovoltaica riguarda lo spessore della cella solare: basti pensare che, come detto nel precedente paragrafo, il costo di quest'ultima è maggiore all'aumentare della quantità di materiale che la tecnologia richiede. Di conseguenza si cercherà di ridurre il volume, in particolare nel caso delle celle in silicio mono cristallino e multi-cristallino, preservando allo stesso tempo le prestazioni. La conseguente riduzione dello spessore del semiconduttore porta infatti al decremento della quantità di fotoni assorbiti, provenienti dal sole.

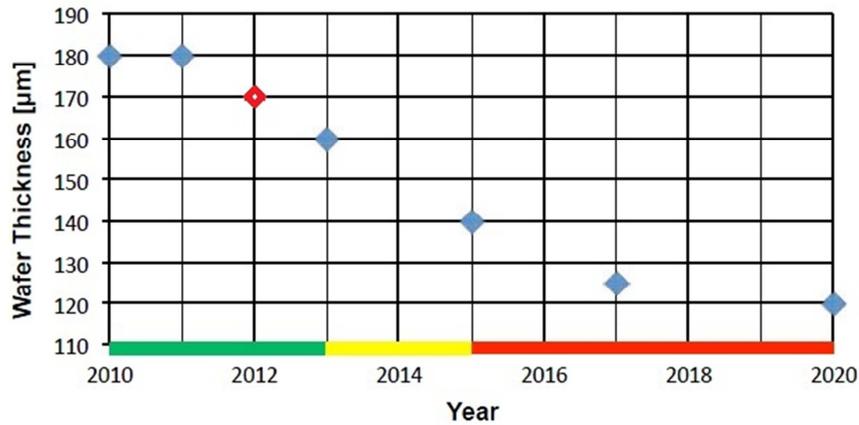


Figura 1: Grafico rappresentante il possibile andamento riguardante lo spessore dei wafer per celle solari, in base al tempo. Attualmente lo spessore è di circa 170µm, mentre per il 2020 si prevede una riduzione fino a 120µm [2].

La diminuzione della corrente fotogenerata dovuta alla riduzione dello spessore delle celle, può essere potenzialmente compensata da una tecnica di intrappolamento della radiazione (*light trapping*) che consente l'aumento della quantità di fotoni assorbiti nel materiale semiconduttore. Per tale motivo, un possibile andamento di tale riduzione, può essere riassunto nella Figura 1: in particolare nel 2020 si prevede una riduzione di 50µm di spessore rispetto agli attuali standard [2].

Il *light trapping* consente di aumentare numerose volte la lunghezza del cammino ottico dei fotoni, in modo tale che questi non vengano persi per riflessione alla superficie esterna della cella o per trasmissione, ma subiscano multiple riflessioni all'interno di essa, accrescendo la probabilità di assorbimento [3].

Per poter studiare tali tecniche, nel seguente testo si andranno ad analizzare i parametri fondamentali e le figure di merito dei dispositivi fotovoltaici, per poi proseguire con la discussione delle tecniche più diffuse per l'intrappolamento della luce solare.

La parte finale riguarderà la simulazione ottica mediante strumenti di soluzione numerica delle *equazioni di Maxwell* di alcune strutture di *light trapping* di interesse per celle solari in silicio monocristallino, sia bi-dimensionali (2-D) che tri-dimensionali (3-D), quali le *V-groove*, le *inverted pyramid* e le *upright pyramid*, sia con *anti-reflection coating* (ARC) che non. Il riferimento adottato per il confronto in termini di prestazioni sarà il caso delle superfici planari.

1 Introduzione alla conversione fotovoltaica e principali figure di merito delle celle solari

1.1 CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

La conversione fotovoltaica è un fenomeno che, per l'appunto, converte l'energia irradiata dal Sole, in corrente elettrica, catturandola attraverso dispositivi chiamati celle solari.

L'effetto fotovoltaico (*photovoltaic effect* o *PV effect*) può essere chiarito come segue: un elettrone che si trova nella banda di valenza, viene spinto nella banda di conduzione dal fotone assorbito [4]; quest'ultimo però, per dar luogo all'effetto in oggetto, deve trasportare una quantità di energia minima, che è proporzionale alla sua frequenza. Ad esempio, nel caso di un semiconduttore a band-gap relativamente alto, come il *cadmium sulfide* (CdS , $E_G = 2.42 \text{ eV}$) un fotone di luce rossa (lunghezza d'onda 650nm), non trasporta una quantità di energia sufficiente a spostare un elettrone, mentre un fotone di luce blu o ultravioletta (lunghezza d'onda 450nm), possiede un'energia maggiore, ed è in grado di metterlo in movimento, con la relativa creazione di coppie elettrone-lacuna. In generale tutti i fotoni con energia superiore a quella di band-gap (nel caso del CdS corrisponde ad una lunghezza d'onda di 510nm) possono dar luogo ad assorbimento; per tutti gli altri il semiconduttore è trasparente.

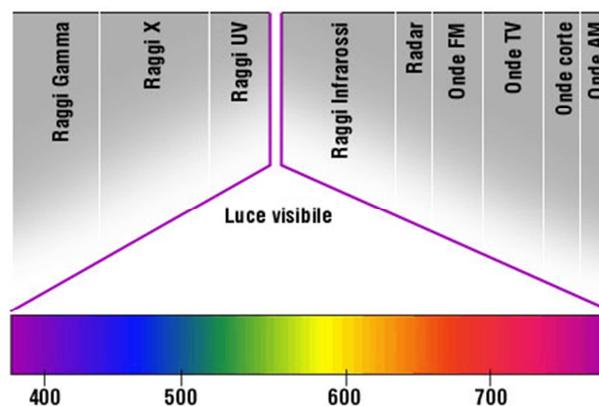


Figura 2: Rappresentazione dello spettro solare. In particolare vengono messe in evidenza le lunghezze d'onda corrispondenti alla luce visibile dall'occhio umano, che indicativamente è racchiusa nell'intervallo tra 380nm a 760nm [5].

La luce con lunghezza d'onda compresa tra 400nm e 1100nm, investendo il reticolo cristallino di un semiconduttore, come il silicio ($E_G = 1.1 \text{ eV}$), realizza la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune in banda di valenza. Si rendono pertanto

disponibili portatori di carica, che possono essere sfruttati per generare una corrente [6].

1.2 CELLE SOLARI IN SILICIO

Si è parlato non a caso, come esempio di semiconduttore, del silicio: questo perché è un materiale particolarmente diffuso in elettronica, ma soprattutto è il materiale più utilizzato per la fabbricazione di celle fotovoltaiche.

Le celle solari sono dispositivi a stato solido che convertono l'energia della luce solare in elettricità. Rappresentano perciò l'elemento base dei moduli fotovoltaici: le celle si compongono di uno strato di semiconduttore, in modo da formare una giunzione di tipo p-n che aiuta la separazione delle coppie di portatori elettronici, generate per effetto fotovoltaico all'interno dello stesso materiale semiconduttore. Tipicamente la cella solare è dotata di un contatto (o elettrodo) di emettitore, che può essere costituito da un materiale conduttivo trasparente (TCO, *Transparent Conductive Oxide*) o da una griglia metallica, che viene progettata in modo tale da ridurre al minimo la frazione oscurata della superficie, nonché la resistenza serie parassita del contatto stesso [7].

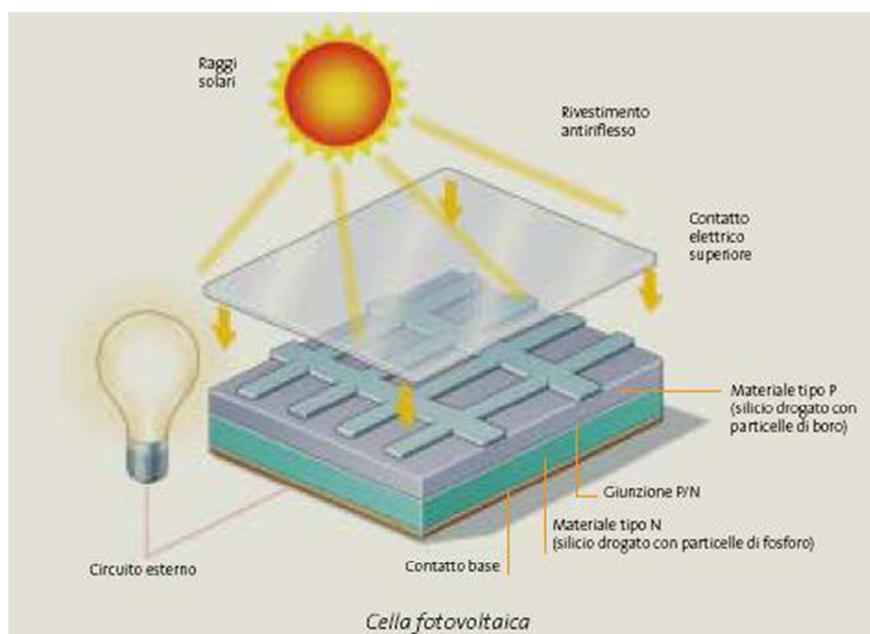


Figura 3: Rappresentazione schematica di una cella fotovoltaica irradiata dalla luce solare [8].

I materiali di cui sono composte le celle solari sono numerosi, a seconda dell'entità del risultato che si vuole ottenere e dei costi da sostenere. Nel seguito

il presente elaborato farà riferimento alle celle in silicio cristallino (o monocristallino), che è costituito da una struttura reticolare cristallina ordinata, nella quale ciascun atomo giace idealmente in una predeterminata posizione [9].

Successivamente saranno esplicitati i motivi per cui le celle in c-Si sono le più comuni e le più utilizzate, non prima di aver illustrato le figure di merito dei dispositivi fotovoltaici.

1.3 PARAMETRI E FIGURE DI MERITO DELLE CELLE SOLARI

I parametri elettrici ed ottici costitutivi dei mezzi materiali, nonché le principali figure di merito delle celle solari, vengono discusse nel presente paragrafo. Tra i parametri ottici dei materiali, in particolare verranno discussi l'indice di rifrazione ed il coefficiente di assorbimento che determinano le modalità con le quali avvengono i fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione. Per quanto riguarda le figure di merito, il paragrafo è focalizzato sulla corrente di corto circuito, la tensione di circuito aperto, il *fill factor* e l'efficienza.

1.3.1 INDICE DI RIFRAZIONE

La rifrazione è un fenomeno fisico dovuto al cambiamento della velocità di propagazione attraverso un mezzo diverso dal precedente nel quale l'onda stava viaggiando.

Quando la luce attraversa una superficie di separazione tra due mezzi in cui la luce si propaga a velocità diversa, come l'aria e il silicio cristallino, i raggi luminosi vengono deviati per effetto della rifrazione. La *Legge di Snell* stabilisce l'entità della deviazione della luce dovuta al passaggio da un mezzo all'altro. L'angolo con cui un raggio viene deviato dipende dalle velocità relative con cui la luce si propaga nei due mezzi: nello specifico, il rapporto delle velocità è uguale al rapporto fra i seni degli angoli di incidenza (1.1), misurati rispetto alla perpendicolare alla superficie di separazione. Perciò, nel passaggio dall'aria al materiale della cella solare, l'onda luminosa devia verso l'interno e il suo cammino si accorcia [6].

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\hat{n}_2}{\hat{n}_1} \quad (1.1)$$

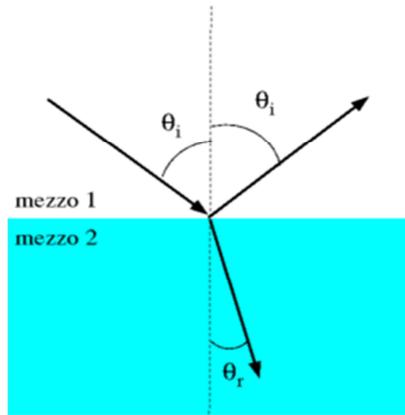


Figura 4: Legge di Snell. Dimostrazione della rifrazione attraverso due mezzi differenti.

Come si può notare dalla formula (1.1), la *Legge di Snell* si può calcolare come rapporto tra gli indici di rifrazione, ossia numeri adimensionali che descrivono come la luce si propaga attraverso un mezzo materiale. Indicato dal simbolo \hat{n} , l'indice di rifrazione rappresenta il fattore numerico dal quale la lunghezza d'onda e la velocità della radiazione vengono ridotti rispetto ai valori che possiedono nel vuoto: l'indice di rifrazione dipende dal materiale, dalla lunghezza d'onda e da altri parametri fisici come la temperatura.

L'indice di rifrazione, analizzando le celle solari, stabilisce come i fotoni di cui è costituita la luce, attraversano la superficie del dispositivo; di conseguenza, è necessario ottimizzare le superfici esterne e le interfacce interne del dispositivo in modo da minimizzare la riflessione e la trasmissione. L'ottimizzazione di tali superfici riguarda la geometria e la scelta dei mezzi materiali che le costituiscono.

1.3.2 RIFLESSIONE

La riflessione identifica il fenomeno per cui avviene un cambio di direzione da parte di un'onda, quando quest'ultima si propaga lungo un'interfaccia formata da materiale riflettente.

In particolare, solo una parte della potenza incidente viene riflessa (R), e la rimanente parte viene invece trasmessa.

Per quanto riguarda la frazione riflessa, può essere calcolata in tale maniera:

$$R = \frac{(\hat{n}-1)^2 + \hat{k}^2}{(\hat{n}+1)^2 + \hat{k}^2} \quad (1.2)$$

Dove \hat{k} è conosciuto come *extinction coefficient*, e identifica la parte immaginaria dell'indice di rifrazione. Difatti, quando un materiale presenta assorbimento, è appropriato rappresentare l'indice di rifrazione tramite numero complesso:

$$\hat{n}_c = n - j\hat{k} \quad (1.3)$$

nella quale n rappresenta la parte reale.

La riduzione della porzione di radiazione riflessa avviene attraverso strati anti-riflessione e con l'introduzione di tecniche, tra le quali la testurizzazione dell'interfaccia esposta alla radiazione [10].

1.3.3 ASSORBIMENTO

Come detto in precedenza (Paragrafo 1.3.1), la parte dell'onda che non viene riflessa, viene rifratta all'interno della cella in questione: in questa fase del processo si ha l'obiettivo di massimizzare l'assorbimento di fotoni per permettere di sfruttare al meglio l'energia solare.

In generale, si ha assorbimento nel caso in cui la materia sia esposta a radiazione elettromagnetica, in dipendenza dalle proprietà ottiche del materiale e dalla lunghezza d'onda della radiazione.

Nota la lunghezza d'onda λ della radiazione, tipicamente espressa in nm nella gamma spettrale del visibile, il coefficiente di assorbimento del mezzo materiale è legato alla parte immaginaria dell'indice di rifrazione complesso (1.3), mediante la seguente relazione:

$$\alpha = \frac{4\pi\hat{k}}{\lambda} \quad (1.4)$$

Nella Figura 5 è rappresentato l'andamento di alcuni coefficiente di assorbimento, riferiti a differenti materiali, tra cui il silicio (curva rossa), in funzione della lunghezza d'onda.

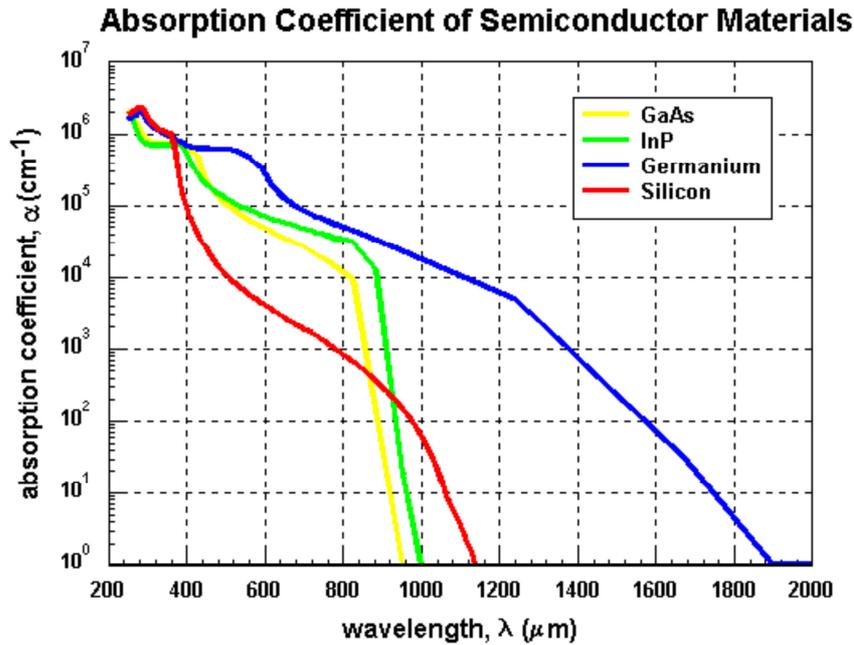


Figura 5: Grafico rappresentante il coefficiente di assorbimento in relazione alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa, riferito a diversi materiali semiconduttori [11].

Il coefficiente di assorbimento restituisce una misura della profondità di penetrazione della radiazione all'interno del materiale ad una data lunghezza d'onda, entro la quale la probabilità di generazione di portatori per effetto fotovoltaico è significativamente alta. Nei materiali semiconduttori, come il silicio, si ha un valore netto di energia per ogni banda per cui, se la luce possiede energia minore rispetto all'intervallo di band-gap, non riesce ad eccitare gli elettroni in modo da condurli nella banda di conduzione. In questo caso non si ha perciò assorbimento.

In termini di energia, ponendo E_1 , E_2 rispettivamente i livelli di energia iniziale (quindi inferiore) e finale (quindi superiore) di una particella come l'elettrone, la quantità di energia che dovrà assorbire sarà pari a:

$$E_{ass} = E_2 - E_1 \quad (1.5)$$

con genericamente $E = h\nu$ dove:

E è l'energia del fotone,

$h = 6,626006957(29) \cdot 10^{-34} Js$ è la costante di Planck,

ν è la frequenza della radiazione elettromagnetica.

Quando il fotone viene assorbito, si ha poi la possibilità di eccitare un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione: il fattore chiave che determina se il fotone verrà assorbito o sarà trasmesso è rappresentato dalla sua energia.

Pertanto, la quantità di energia posseduta dai fotoni E_{ph} è definibile tramite una suddivisione in tre categorie, che viene confrontata alla quantità di energia necessaria a effettuare il salto, E_G :

$E_{ph} < E_G$: fotoni con energia inferiore all'energia della band-gap, interagiscono solo debolmente con il semiconduttore, passandogli attraverso come se questo fosse trasparente;

$E_{ph} = E_G$: in questo caso i fotoni possiedono un'energia sufficiente da creare una coppia elettrone lacuna;

$E_{ph} > E_G$: i fotoni vengono assorbiti con alta probabilità, ma nel caso in cui la loro energia sia troppo elevata rispetto alla E_G , si ha una dispersione di energia per effetto termico [12].

1.3.4 TRASMISSIONE

Per i dispositivi fotovoltaici, la riflessione e la trasmissione sono processi che provocano la perdita di energia, in quanto i fotoni non vengono assorbiti dalle celle fotovoltaiche. Di conseguenza, tendenzialmente si aspira a ridurre la porzione di energia incidente trasmessa dalla struttura verso l'esterno, in modo tale da non risultare trasparente alla radiazione [13].

Le tecniche di *light trapping* sono infatti importanti nella riduzione della trasmissione di fotoni. La tecnica principale che consente di farlo è data dall'impiego di un riflettore nell'interfaccia posteriore (*back reflector*); tipicamente le celle in silicio cristallino possiedono un contatto posteriore realizzato da un piano di metallo (generalmente alluminio) che assolve sia la funzione di elettrodo che di *back reflector*. Idealmente il coefficiente di riflessione di un riflettore è 1.0, tuttavia nei casi reali, l'interfaccia semiconduttore/alluminio ha un coefficiente di riflessione compreso tra 0.65 e 0.80 [10].

1.3.5 CORRENTE DI CORTO CIRCUITO E DENSITA' DI CORRENTE DI CORTO CIRCUITO

La corrente di corto circuito I_{SC} identifica la corrente che attraversa la cella solare, quando la tensione ai capi di essa è pari a zero (ossia quanto la cella è in corto

circuito). In Figura 6 viene mostrata la curva corrente-tensione di una cella fotovoltaica.

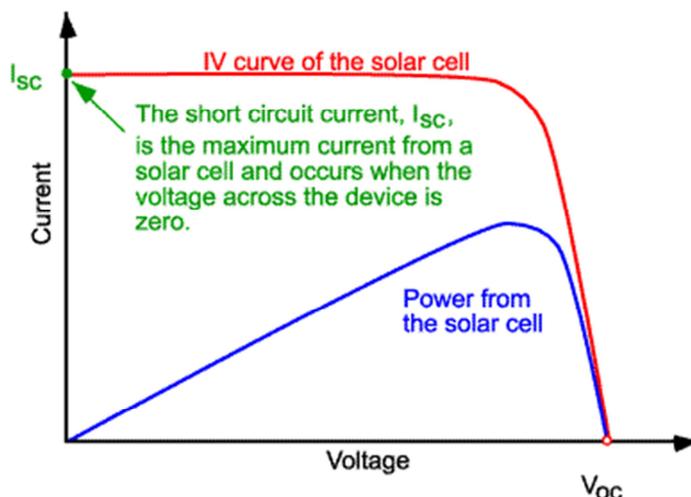


Figura 6: Andamento della caratteristica I-V fornita da una cella fotovoltaica (rosso) e della rispettiva potenza generata (blu). Si è evidenziato il punto rappresentante la corrente di corto circuito I_{sc} , ossia la massima corrente teoricamente erogabile dalla cella [14].

La corrente di corto circuito è una porzione più o meno significativa della corrente fotogenerata, dovuta ai fotoni assorbiti (detta anche corrente di illuminazione).

Nel caso ideale, ovvero nel caso in cui non vengono considerate anche le perdite elettriche (ricombinazioni di portatori nel semiconduttore), la I_{sc} corrisponde perfettamente alla corrente di illuminazione I_L (*light-generated current*), ossia quella corrente che viene generata all'interno della cella attraverso l'assorbimento di fotoni, tramite la creazione di coppie elettroni-lacune ed infine la separazione spaziale dell'elettrone dalla lacuna.

In condizioni di corto circuito, la corrente che viene misurata esternamente è la I_{sc} . Nel momento in cui si rinuncia all'ipotesi di idealità del dispositivo, la corrente di corto circuito non è identificabile con quella fotogenerata [14].

La corrente di corto circuito, sotto l'ipotesi che il tasso di generazione G sia uniforme all'interno del volume del semiconduttore, è definita di seguito:

$$I_{sc} = I_L = qAG (L_e + W + L_h) \quad (1.6)$$

dove q identifica la carica elementare, A è l'area della cella solare, G è il tasso di generazione (o *generation rate*), L_e e L_h sono rispettivamente le lunghezze di diffusione degli elettroni e delle lacune e W è l'ampiezza della regione di svuotamento [4] [10].

La densità di corrente di corto circuito dipende da numerosi fattori:

- L'area A della cella solare: per evitare la dipendenza dall'area della cella, è molto comune l'utilizzo della densità della corrente di corto circuito J_{SC} , misurata in mA/cm^2 .
- Il flusso incidente di fotoni che per ciascuna lunghezza d'onda dipende dalle caratteristiche spettrali della sorgente di illuminazione. Convenzionalmente si utilizza lo spettro standardizzato AM1.5G [4] con irradianza pari a $1000\text{W}/\text{m}^2$.
- Le proprietà ottiche del materiale (assorbimento e riflessione).
- La probabilità di raccolta (o efficienza di collezione) dei portatori fotogenerati agli elettrodi, che dipende principalmente dalla passivazione della superficie della cella e dal tempo di vita dei portatori minoritari.

La densità di corrente di corto circuito –che coincide con quella fotogenerata sotto l'ipotesi di assenza di ricombinazioni superficiali (superfici perfettamente passivate)-, assumendo un tasso di generazione ottica spazialmente uniforme, è data da:

$$J_{SC} = qG (L_e + L_h) \quad (1.7)$$

In tale equazione non vengono presi in considerazione l'area e la larghezza della giunzione, con una conseguente riduzione della complessità dei calcoli.

Sebbene questa espressione sia stata derivata sotto l'ipotesi di significative approssimazioni, essa esprime una forte dipendenza dal tasso di generazione ottica e dalla lunghezza di diffusione.

Per una cella in silicio cristallino con sorgente standard AM1.5G ($1000\text{W}/\text{m}^2$), la corrente massima che si può raggiungere è all'incirca di $46\text{mA}/\text{cm}^2$ [15]. In laboratorio sono stati prodotti dispositivi in grado di erogare una corrente di corto circuito sopra ai $42\text{mA}/\text{cm}^2$ [15], mentre le celle fotovoltaiche in commercio possiedono un valore di I_{SC} compreso tra i $28\text{mA}/\text{cm}^2$ e i $35\text{mA}/\text{cm}^2$ [15].

Per ottenere il valore massimo teorico di corrente di corto circuito, [15] ci si pone in condizioni di idealità, per cui ogni fotone che viene assorbito dalla cella solare, con una quantità di energia maggiore rispetto a quella relativa all'energia di band-gap, contribuisce con un elettrone alla corrente che circola nel circuito esterno.

Quindi, per calcolare la I_{SC} , il flusso di fotoni deve essere noto e può essere determinato attraverso la distribuzione di energia dei raggi solari, ossia dividendo la quantità di energia, ad una certa lunghezza d'onda, per l'energia di ogni fotone. Il risultato è tradotto graficamente in Figura 7.

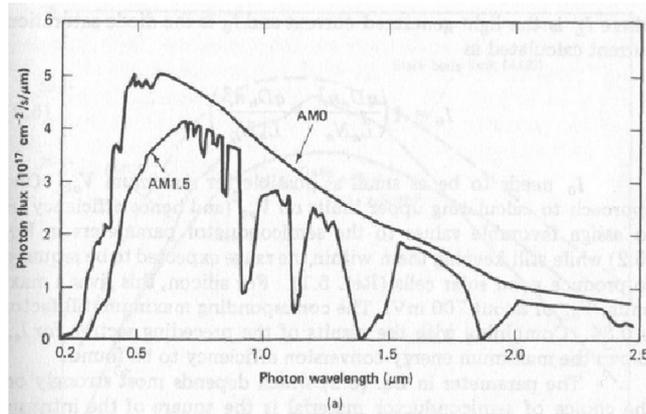


Figura 7: Rappresentazione grafica relativa al flusso di fotoni in funzione della lunghezza d'onda, con spettro AM 0G e AM 1.5G [10].

Per calcolare il valore teorico della massima corrente di corto circuito, il flusso di fotoni associato allo spettro considerato viene integrato all'interno dello spettro solare, secondo la seguente formula:

$$J_{SC} = q \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \Phi(\lambda) d\lambda \quad (1.8)$$

La relazione che esiste tra l'energia dei fotoni espressa in [eV] e la sua lunghezza d'onda in [μm] è data da:

$$E[\text{eV}] = \frac{1,24}{\lambda} [\mu\text{m}] \quad (1.9)$$

Per il silicio, l'energia di band-gap è circa a 1.10eV, ciò corrisponde a 1.13 μm . I valori dei limiti massimi di densità di corrente di corto circuito sono riportati in Figura 8.

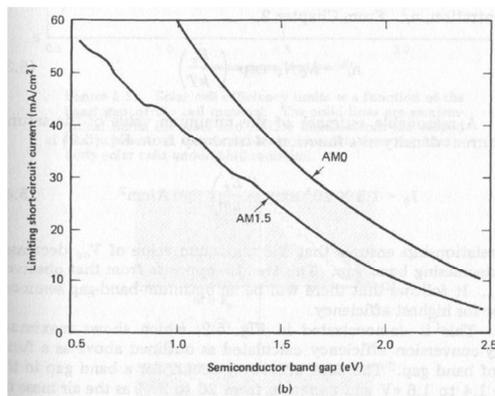


Figura 8: Grafico rappresentante la densità di corrente di corto circuito, in funzione del band gap del semiconduttore [10].

1.3.6 TENSIONE DI CIRCUITO APERTO

La tensione di circuito aperto V_{OC} rappresenta la massima tensione ai capi di una cella solare, quando il dispositivo non è attraversato da corrente (perciò viene detta di circuito aperto).

La curva di Figura 9 riporta la tensione di circuito aperto:

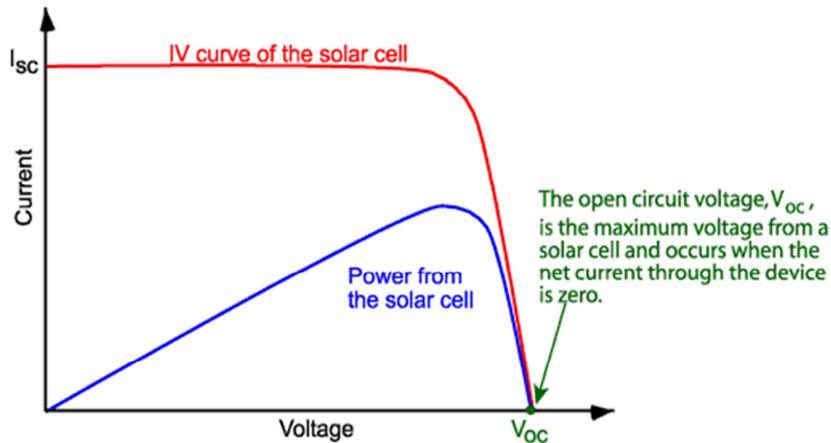


Figura 9: Andamento della caratteristica I-V fornita da una cella fotovoltaica (rosso) e della rispettiva potenza generata (blu). Si è evidenziato il punto rappresentante la tensione di circuito aperto V_{OC} , ossia la massima tensione teoricamente erogabile [16].

La V_{OC} si calcola a partire dalla caratteristica della giunzione illuminata (1.6) imponendo una corrente nulla:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (1.10)$$

Dove $k = 1.3806505 (24) \cdot 10^{-23} JK^{-1}$ è la costante di Boltzmann, T è la temperatura.

Come si nota dall'equazione (1.10), la tensione V_{OC} dipende dal logaritmo del rapporto tra corrente di illuminazione e corrente di saturazione I_0 della cella solare.

La corrente di saturazione dipende dall'entità dei fenomeni di ricombinazione nella cella solare, di conseguenza la tensione di circuito aperto rappresenta una misura delle perdite di ricombinazione del dispositivo. Nelle celle a silicio cristallino, in particolare quelle costruite con materiale di alta qualità, la V_{OC} raggiunge valori di tensione pari a 730mV, sempre in condizioni di radiazione

standard AM 1.5G, mentre quelle a silicio policristallino si arriva attorno ai 600mV [16].

Per rendere massima la tensione di circuito aperto è necessario che il termine I_0 sia il più piccolo possibile. Il calcolo del valore teorico massimo della V_{OC} può essere effettuato tenendo conto di modelli semi-empirici della corrente di saturazione del diodo, quali quello proposto da M.A. Green in [10]:

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) = 1,5 \cdot 10^5 e^{-\frac{E_g}{kT}} \left[\frac{A}{cm^2} \right] \quad (1.11)$$

dove per l'appunto compaiono rispettivamente:

- la concentrazione intrinseca n_i ;
- le concentrazioni di atomi accettori e donatori N_A e N_D ;
- i coefficienti di diffusione della materia, relativi agli elettroni D_e e alle lacune D_h ;
- l'area della sezione trasversale della giunzione.

Quindi la scelta del materiale semiconduttore è di rilevante importanza, anche per il fatto che il minimo valore della corrente di saturazione è funzione del band gap, in base all'equazione (1.11). Tale rapporto garantisce che la massima V_{OC} decresca al diminuire dell'intervallo di band gap, al contrario di ciò che è stato osservato con la corrente di corto circuito [10].

1.3.7 FILL FACTOR

Il *fill factor* (FF), è uno dei parametri più importanti dal punto di vista delle prestazioni della cella solare. Identifica infatti il rapporto tra la potenza massima e la potenza massima teorica $V_{OC}I_{SC}$.

$$FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (1.12)$$

Il FF è chiamato fattore di riempimento perché graficamente rappresenta il rapporto tra le due aree poste in evidenza in Figura 10.

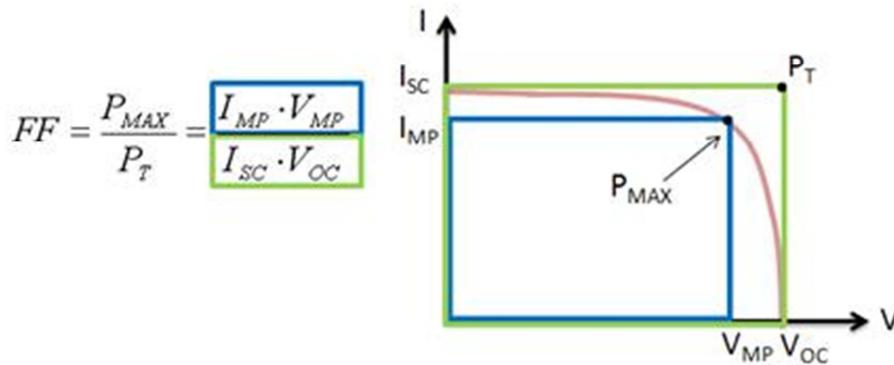


Figura 10: Caratteristica I-V di una cella solare, dove i rettangoli rappresentano il FF, determinati dalle potenze erogate dalla cella in rapporto alla massima potenza teorica [17].

Valori tipici per questo parametro sono tra lo 0.70 e lo 0.85, idealmente il $FF = 1$ [10].

In particolare, per celle in silicio cristallino, il massimo *fill factor* misurato in via sperimentale in laboratorio è di 0.85, mentre quello dei dispositivi in commercio è di circa 0.78 [18].

Uno dei requisiti principali al fine di ottenere FF relativamente alti, è quello di presentare basse perdite resistive parassite in serie, e una maggior resistenza possibile di shunt R_{SH} della cella.

Quest'ultima è un parametro la cui presenza quantifica le perdite più significative che si possono trovare nella cella fotovoltaica. La resistenza di shunt è tipicamente causata dalla presenza di difetti nella costruzione e da impurità estranee nella regione della giunzione: pertanto crea perdite nella giunzione p-n attorno ai bordi della cella e nelle regioni non periferiche. Un esempio di circuito equivalente che esplica il ruolo della resistenza di shunt, è presentato nella Figura 11 [19].

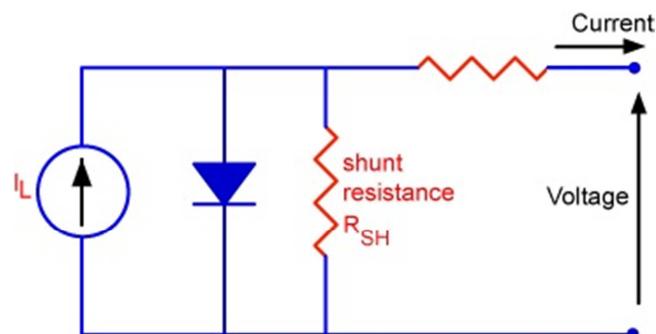


Figura 11: Circuito equivalente a parametri concentrati ad un diodo di una cella solare che comprende la resistenza di shunt, nonché la resistenza di serie [19].

1.3.8 EFFICIENZA E QUANTUM EFFICIENCY

Un altro parametro di grande rilevanza dal punto di vista delle prestazioni delle celle è l'efficienza, che indica il rapporto tra la potenza in uscita nel circuito esterno della cella e la potenza in ingresso.

$$\eta = \frac{V_{mp}I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{OC}I_{SC}FF}{P_{in}} \quad (1.13)$$

dove P_{in} rappresenta la potenza totale incidente sulla superficie della cella dovuta all'incidenza dei raggi su quest'ultima.

L'efficienza inoltre dipende dallo spettro e dall'intensità dell'onda luminosa del Sole, e dalla temperatura di lavoro del dispositivo: le celle solari in commercio sono quindi testate alla temperatura di 25°C e in condizioni di irradiazione standard secondo lo spettro convenzionale di AM 1.5G alle condizioni di irradiazione di 1000 W/m² [20].

Occorre mettere in evidenza che al crescere dell'energia di band-gap E_g , la corrente di cortocircuito aumenta e la tensione di circuito aperto diminuisce, di conseguenza come risultato si ha che l'efficienza in funzione di E_g è rappresentata da una curva con caratteristica a campana che esibisce un massimo all'interno dell'intervallo di E_g tra 1.4eV e 1.6eV (Figura 12).

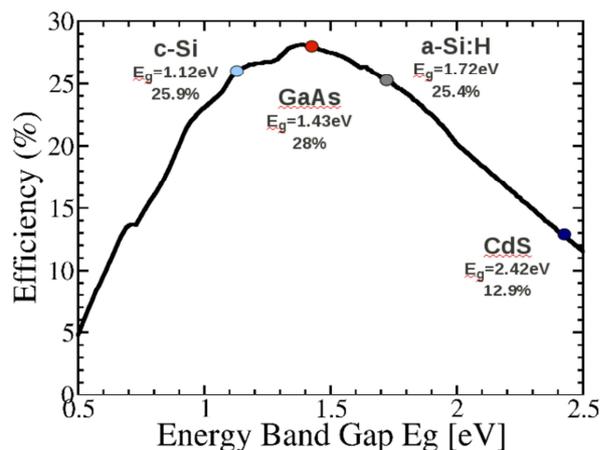


Figura 12: Grafico rappresentante l'efficienza in funzione del band gap del materiale.

In particolare, la massima efficienza teorica all'interno di tale intervallo di E_g è pari al 29% (AM 1.5G, 1000W/m^2). Per il silicio cristallino (con $E_g = 1.12\text{eV}$), la massima efficienza teorica è del 26%. In realtà i dispositivi fabbricati in laboratorio oppure a livello commerciale, sono caratterizzati da valori delle figure di merito anche significativamente inferiori a quelli ideali. A livello commerciale, nel panorama delle celle solari a singola giunzione, l'efficienza delle celle in silicio cristallino è di norma superiore a quella di altri materiali semiconduttori comunemente utilizzati, oppure alle celle in film sottile: si calcola che l'efficienza η per i moduli commerciali in silicio cristallino sia di circa il 16-17%, mentre l'efficienza di celle in film sottile non supera tipicamente il 12% [10].

A pari importanza dell'efficienza di conversione, è l'efficienza quantica o *quantum efficiency* (QE). Per un dispositivo fotosensibile, rappresenta la quantità percentuale di fotoni che colpisce la superficie fotoreattiva e che può quindi produrre una coppia elettrone-lacuna.

In particolare, la QE è data dal rapporto tra gli elettroni raccolti e i fotoni incidenti in funzione della lunghezza d'onda λ della luce.

L'efficienza quantica dipende quindi direttamente dalla λ , come si può notare dal grafico sottostante.

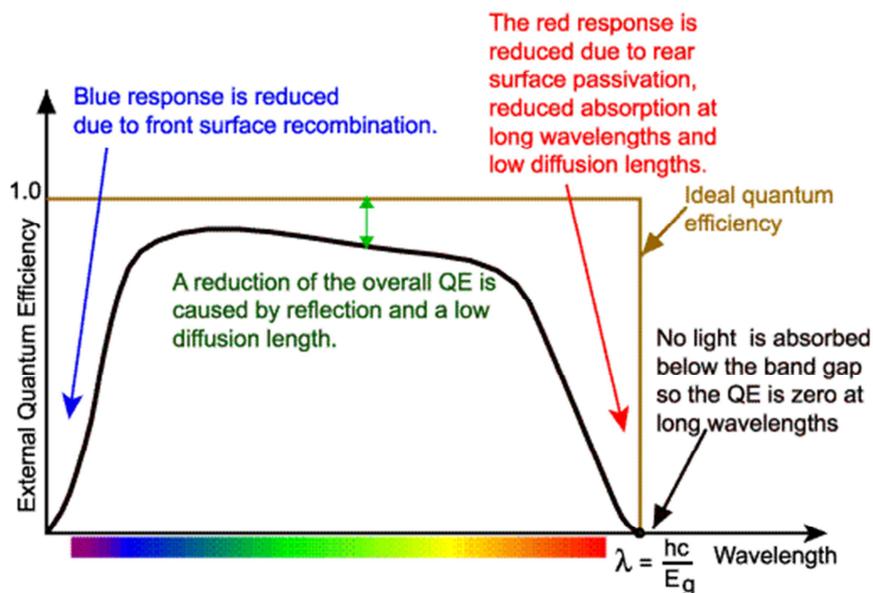


Figura 13: Grafico rappresentante l'efficienza quantica di una cella solare in silicio in funzione della lunghezza d'onda. In condizioni ideali, l'efficienza può essere rappresentata come la curva color oro. Si noti inoltre che non verrà assorbita luce al di sotto del gap di banda, per cui l'efficienza a lunghezze d'onda troppo elevate sarà nulla [21].

Se tutti i fotoni ad una certa lunghezza d'onda vengono assorbiti e le cariche elettriche risultanti sono raccolte, l'efficienza quantica relativa a quella

determinata λ , è quella ideale e pari a 1. La QE al di sotto dell'intervallo di band-gap è ovviamente pari a zero.

La *quantum efficiency* restituisce quindi informazioni riguardanti la corrente che una cella produce quando viene illuminata ad una specifica lunghezza d'onda. Se la QE è calcolata su tutto lo spettro elettromagnetico solare, è possibile valutare la corrente che la cella stessa produce, quando la luce incide su di essa. Il rapporto tra questa corrente e la massima possibile (ossia quando il QE è al 100% in tutto lo spettro) indica l'efficienza elettrica della cella.

Una misurazione che spesso viene utilizzata per questi dispositivi è l'*external quantum efficiency* (EQE) ossia l'efficienza quantica esterna (solitamente indicata più semplicemente come QE), che determina la corrente ottenuta dal dispositivo in base ai fotoni incidenti.

Infine, sempre correlate alle QE e EQE, si possono ottenere inoltre informazioni sull'indice di riflessione, attraverso l'*internal quantum efficiency* (IQE), che rappresenta il rapporto tra elettroni raccolti e fotoni assorbiti.

1.3.8.1 EQE e IQE

L'EQE e l'IQE sono legati tra loro dalla capacità di assorbimento della luce (LHE, *Light Harvesting Efficiency*) del materiale assorbente in funzione della lunghezza d'onda. Ne risulta che IQE è più elevato dell'EQE in quanto quest'ultimo si riferisce ai fotoni incidenti, mentre l'IQE ai soli fotoni assorbiti. L'IQE dipende a sua volta dall'efficienza di raccolta delle cariche fotogenerate agli elettrodi. EQE e IQE permettono quindi di valutare le prestazioni della cella, in termini di fotoni assorbiti, e in termini di efficienza di creazione e raccolta delle cariche agli elettrodi, in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente. Un parametro chiave è il valore massimo EQE_{max} o IQE_{max} che misura quindi la qualità del materiale usato e del dispositivo fabbricato. Mentre è possibile ottenere valori di IQE_{max} uguali a 1 (ovvero tutti i fotoni assorbiti vengono convertiti in elettroni ad una data lunghezza d'onda), in genere EQE_{max} arriva al massimo attorno a 0.90. L'integrale, su tutte le lunghezze d'onda, di EQE per lo spettro di riferimento AM 1.5G equivale alla densità di corrente globale J_{sc} [21] [24].

In sostanza, l'efficienza quantica esterna indica il numero di elettroni che contribuiscono alla corrente di corto circuito in rapporto al numero di fotoni incidenti. Il valore è espresso come risposta in corrente per unità di potenza incidente:

$$EQE = \frac{\text{elettroni/secondo}}{\text{fotoni/secondo}} \quad (1.14)$$

ovvero

$$EQE = \frac{hc}{q\hat{n}\lambda} \left(\frac{i}{P} \right) \quad (1.15)$$

dove h è la costante di Planck, c indica la velocità della luce nel vuoto, q è la carica elementare, \hat{n} è l'indice di rifrazione dell'aria, λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente, i misura la corrente ed infine P la potenza incidente.

La EQE dipende quindi anche dall'assorbimento della luce e dalla raccolta di cariche: una volta che il fotone è stato assorbito, e che quindi ha generato una coppia elettrone-lacuna, le cariche devono essere separate a livello della giunzione, e raccolte agli elettrodi della cella. Un materiale semiconduttore caratterizzato da una bassa quantità di difetti, in accoppiamento ad una architettura ottimizzata della cella, evita la ricombinazione di carica fotogenerata, mantenendo valori relativamente alti (prossimi ad 1) di efficienza quantica interna. L'EQE delle celle solari include gli effetti di perdite ottiche, come la trasmissione e la riflessione.

Per quanto riguarda l'*internal quantum efficiency*, si è in presenza di un parametro che identifica i fotoni che non sono né riflessi né trasmessi al di fuori della cella fotovoltaica, e che possono quindi generare una collezione di cariche.

Dalla misurazione della riflessione e trasmissione del dispositivo, la curva che rappresenta l'EQE può essere corretta per ottenere la curva dell'IQE. Più in specifico, l'*internal quantum efficiency* rappresenta il numero di fotoelettroni che contribuiscono alla misurazione della corrente, in rapporto al numero di fotoni assorbiti:

$$IQE = \frac{EQE}{1-R(\lambda)} \quad (1.16)$$

Nella quale si può notare l'indice di riflessione dipendente dalla lunghezza d'onda $R(\lambda)$.

1.4 STATO DELL'ARTE DELLE CELLE IN SILICIO CRISTALLINO

Le celle MINP, PESC e PERL rappresentano alcune soluzioni architetture di celle di estrema importanza nella evoluzione dei dispositivi fotovoltaici.

La MINP (*Metal Insulator N-P junction*) fu la prima cella in silicio a raggiungere il 18% di efficienza, grazie all'impiego di un sistema di contatto con una velocità di ricombinazione intrinsecamente bassa. La superficie sottile di ossido passivato viene posta anche sotto il metallo, per ridurre altresì l'effetto di ricombinazione.

La struttura è rappresentata di seguito.

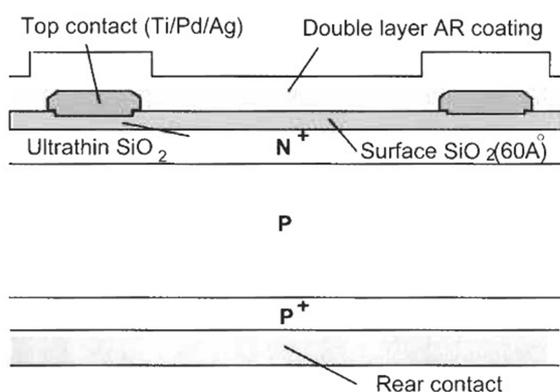


Figura 14: Sezione trasversale di una cella MINP [22].

Come si evince dalla Figura 14, nelle celle MINP si adotta la tecnica di passivazione dei contatti superiori, utilizzando uno strato sottile di ossido sottostante agli stessi, nonché una passivazione successiva, grazie ad un altro strato di ossido, leggermente più spesso. La differenza di spessore rende il processo di costruzione quantomeno complesso, ma è una soluzione necessaria al fine del raggiungimento delle prestazioni massime del dispositivo. Per quanto riguarda il materiale dei contatti superiori, la scelta ricade principalmente sul titanio, in quanto produce un accumulo elettrostatico sottostante al silicio, che porta ad una riduzione della ricombinazione nei contatti stessi.

Dalla cella MINP deriva la costruzione delle celle PESC (*Passivated Emitter Solar Cell*) di Figura 15, in cui un parametro importante come l'efficienza è stato migliorato.

La struttura PESC è simile alla MINP, ad eccezione dei contatti elettrici che sono realizzati direttamente nelle fessure, create nel sottile strato di ossido. L'efficienza del 20% ottenuta mediante le celle PESC fu misurata per la prima volta nel 1985.

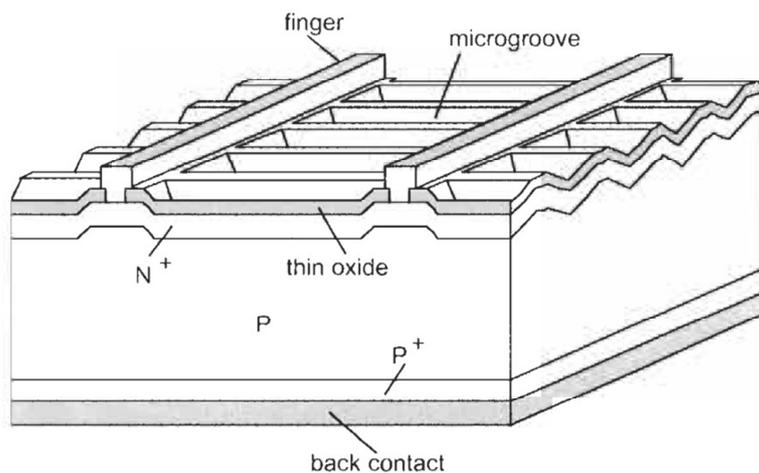


Figura 15: Struttura di una cella PESC [22].

La lavorazione, sia con le celle MINP che con le celle PESC, implica una diffusione superficiale di uno strato di fosforo, l'incremento di ossido passivato e l'incisione nelle regioni dei contatti. In particolare, nelle MINP avviene la deposizione del contatto superiore e successivamente quella dell'ossido. Viene utilizzata la fotolitografia per allineare i contatti superiori con l'area dei contatti. Le celle PESC tuttavia possono trarre vantaggio da una sequenza di passi produttivi relativamente più semplice, in cui il photoresist viene usato per definire l'area dei contatti oltre ai contatti metallici superiori. Questo materiale sensibile alla luce viene poi placcato con argento per incrementare la mobilità degli elettroni nella generazione della corrente. Infine il processo di costruzione delle celle include la deposizione di uno strato in lega di alluminio che randomizza la riflessione della luce, aumentando la probabilità di intrappolamento dei fotoni.

Dalle Figura 14 e Figura 15 si può notare la presenza di semplici contatti superiori paralleli fra loro, chiamati *fingers*, distanziati l'un l'altro da circa 0.8mm. L'area della sezione trasversale dei *fingers*, per ambedue le celle, è di circa $150\mu\text{m}^2$. Queste strutture dimostrarono l'apporto di un considerevole miglioramento dell'intrappolamento della luce, per la prima volta effettuato con celle in silicio, e l'identificazione di una corrente di buio non ideale prodotta dai componenti stessi.

Le celle PESC sono note per le micro scanalature superficiali, che vengono realizzate attraverso la fotolitografia: si utilizzano maschere già progettate, che oscurano le zone dove non è necessario l'attacco della luce, determinando così il modello chiamato anche *microgroove*, il quale aiuta a ridurre le perdite dovute dalle resistenze in serie associate allo strato superficiale, poiché l'area della sezione trasversale di una determinata regione di diffusione incrementa di un fattore $\sqrt{3}$. Di conseguenza il *fill factor* accresce di circa il 10%. Ma il vantaggio più significativo risiede nel valore della corrente in uscita, con un miglioramento

approssimativo del 5% rispetto a celle con superficie planare. Evoluzioni progressive della passivazione portano alla riduzione della ricombinazione, a discapito di un allargamento dell'area e un orientamento meno favorevole dell'esposizione della parte superiore della cella alla luce. Riassumendo, le caratteristiche principali delle celle PESC sono la passivazione superficiale tramite ossido, l'auto-allineamento dei contatti attraverso ossido, la diffusione di giunzione superiore con alta resistenza di foglio, lega di alluminio dello strato posteriore passivato e antiriflesso attraverso la testurizzazione o grazie al doppio strato di ricoprimento.

Combinando le PESC insieme alla doppia passivazione e ad un processo basato sull'impiego di cloro, venne perfezionata una nuova tipologia dei prodotti nell'industria fotovoltaica: le celle PERL (*Passivated Emitter, Rear Locally-diffused cell*) di Figura 16.

Gli effetti dovuti alla struttura caratterizzata dalle micro scanalature delle celle PESC, che risulta ancora essere una delle pietre miliari del fotovoltaico, vengono quindi superati dalla texturing a piramide delle celle PERL, raggiungendo, alla fine degli anni '80, il 23% di efficienza.

Quest'ultimo risultato viene verificato anche grazie al quasi completo avvolgimento della cella in uno strato di ossido passivato e ad una piccola area dei contatti, passivata da una forte diffusione locale. I miglioramenti includono inoltre l'applicazione di uno strato molto più sottile di ossido sulla superficie superiore di passivazione, che consente la diretta connessione con la copertura antiriflettente, aumentando così la corrente di cortocircuito, l'utilizzo di punti di contatto superficiali locali, che provocano l'accrescimento della tensione di circuito aperto ed infine l'ottimizzazione della passivazione posteriore, incrementando il *fill factor*. L'architettura si dimostra quindi molto robusta e tollerante rispetto ad una passivazione bassa e ad un basso tempo di vita del bulk. Ciononostante, sia le PESC che le PERL, necessitano di una numerosa successione di stadi fotolitografici, che portano ad un aumento dei costi di produzione.

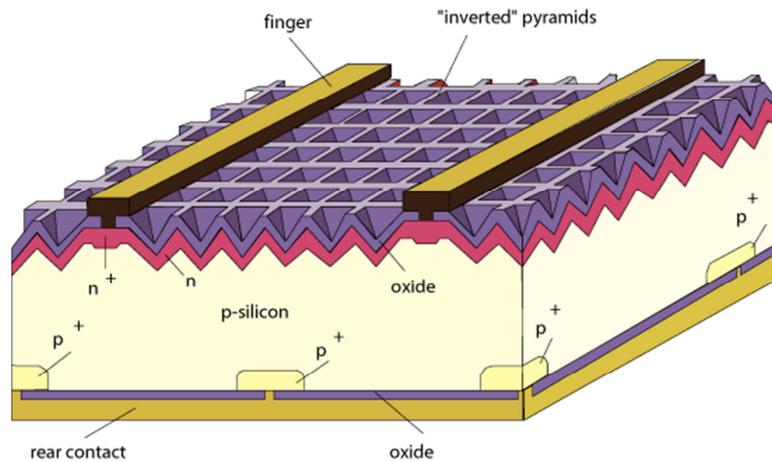


Figura 16: Struttura di una cella PERL [23]. Sono in evidenza le piramidi invertite in qualità di texturing della superficie anteriore esposta alla radiazione.

Dalla Figura 16 rappresentante le celle PERL [23], si possono notare le piramidi invertite, che principalmente possiedono un ruolo importante per le proprietà ottiche della cella. Quando i fotoni vengono a colpire le pareti delle piramidi, questi ultimi hanno maggiore probabilità di essere catturati, venendo riflessi verso il basso: se la luce incidente si trova vicino alla punta della piramide, allora le probabilità di poter essere assorbita si triplicano. Le strutture piramidali sono inoltre ricoperte da uno strato di ossido, di spessore appropriato, che solo di recente è stato ridotto, e da un rivestimento antiriflettente. La luce, all'interno della cella, viaggia in modo obliquo, fino al raggiungimento dell'interfaccia opposta a quella di ingresso: in tale percorso la maggior parte di essa viene assorbita. Al termine della sezione della cella, la luce non assorbita viene riflessa grazie allo strato di alluminio posteriore e di conseguenza torna ad attraversare la cella, fino a che non riaffiora sbattendo contro le facce delle piramidi rovesciate: a quel punto la maggior parte dei fotoni fuoriesce dalla cella. La quantità di luce che, dopo aver compiuto un doppio percorso attraverso la sezione della struttura, viene espulsa, dipende dalla particolare geometria piramidale adottata; quindi il numero di fotoni che non aiutano all'incremento la corrente della cella, può essere ridotto utilizzando piramidi invertite oblique o il *tiler's pattern*, texture che successivamente saranno discusse.

In definitiva, la combinazione delle piramidi invertite e lo strato posteriore riflettente, consente quindi uno schema di intrappolamento della luce molto efficiente [25].

1.5 COSTI, VENDITE E PREVISIONI DEL PV

Nei primi vent'anni di ricerca nelle tecnologie fotovoltaiche, da circa metà degli anni '60 fino agli anni '80, ci si è focalizzati in particolar maniera sul miglioramento dell'efficienza dei prodotti, per ottenere maggior potenza. I costi diminuirono in modo esponenziale quando la produzione delle celle solari passò dalla produzione in piccola scala alla scala semiautomatica.

La figura sottostante (Figura 17) mostra l'andamento nel tempo dei costi e delle vendite del PV fino a circa i primi anni del nuovo secolo: si possono notare come le vendite siano aumentate, soprattutto negli anni '90, e come questo abbia portato alla diminuzione dei prezzi. I costi sono calcolati in *dollari americani/potenza in Watt*, dove W_P indica il picco di potenza del modulo fotovoltaico ideale che avrebbe se fosse illuminato da una potenza luminosa di 1kW/m^2 dello spettro standard, ad una temperatura della cella di 25°C .

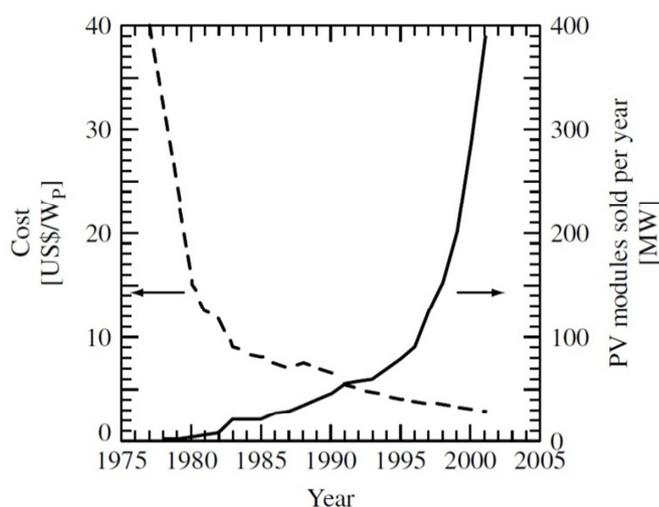


Figura 17: Trend storici di costo per Watt per le celle solari in c-Si e volume di produzione [26].

Va inoltre segnalato che le vendite annuali del PV sono significativamente in crescita, con una media del 33% per anno dal 1995 al 2000. Basandosi sull'elasticità della domanda S , che tecnicamente non è altro che la derivata logaritmica del mercato annuale rispetto al prezzo (cambiato di segno), si può determinare il livello dei prezzi raggiunti nel prossimo futuro.

Di seguito (Figura 18), infatti, è possibile osservare una rapida crescita iniziale, seguita da un periodo con valori più moderati. La curva rappresentante il numero di installazioni del PV negli anni, è determinata dalla disponibilità delle società nell'investire in questa tecnologia. I tre punti in grigio rappresentano il numero di

richieste per l'installazione del PV per far sì che l'utilizzo della tecnologia sia veramente rilevante, sia per la società che per il sostentamento dell'ambiente.

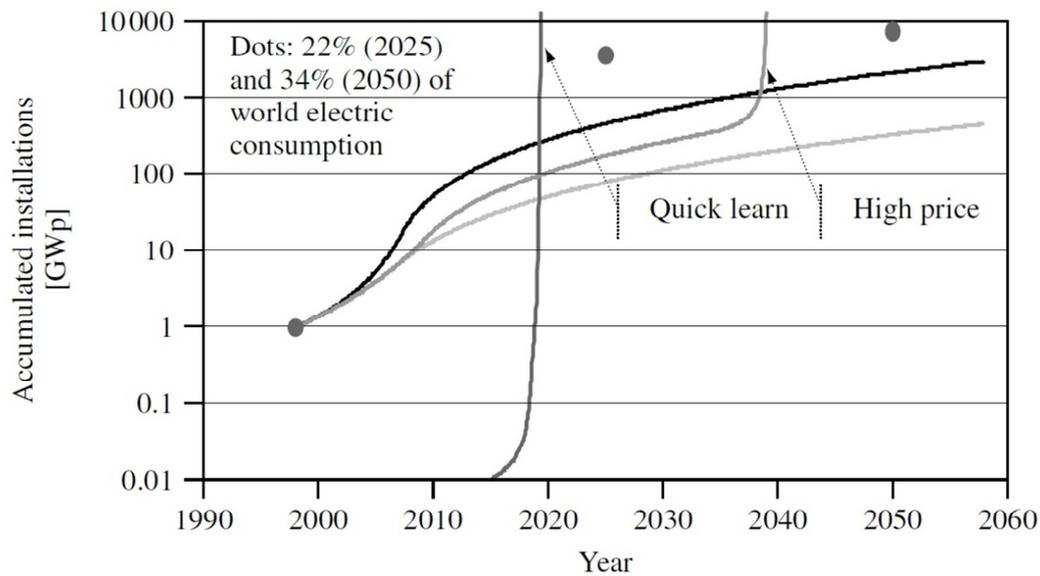


Figura 18: Previsioni a lungo termine del picco di potenza della tecnologia fotovoltaica. I punti rappresentano il livello di penetrazione dell'elettricità per raggiungere gli obiettivi ambientali (vedi testo) [26].

La curva chiamata *high price* si riferisce al caso di eventuale raddoppiamento dei prezzi dell'elettricità, nel quale il PV raggiungerà la competitività tanto agognata come fornitore di energia, mentre "*quick learn*" rappresenta la curva quasi verticale di economicità del fotovoltaico rispetto ai convenzionali rifornitori. Più realisticamente, la curva sarà molto meno accentuata.

Infine si può osservare che il periodo attorno al 2050 sarà quello più decisivo, in quanto l'obiettivo per tale anno sarà quello di portare la produzione di elettricità, attraverso il fotovoltaico, al 34% rispetto a quella totale [26].

2 Tecniche di intrappolamento delle radiazioni in celle solari con wafer di silicio cristallino

2.1 ANTIREFLECTION COATING (ARC)

Ricordando la struttura della cella (Figura 3), si può notare la presenza di uno strato superficiale anti riflessione (*antireflection coating*), che permette di ridurre, in taluni casi al minimo, le interferenze che non consentono ai raggi solari di attraversare la cella. Questa superficie può essere paragonata a quella di una normale lente di una videocamera: è formata da uno strato sottile di materiale dielettrico, di spessore particolare, in maniera tale da provocare uno sfasamento tra l'onda riflessa dal rivestimento della cella e l'onda riflessa dalle superfici del semiconduttore. Questa differenza di fase, interferisce in modo distruttivo nella riflessione, ottenendo una dispersione di energia riflessa nulla (Figura 19).

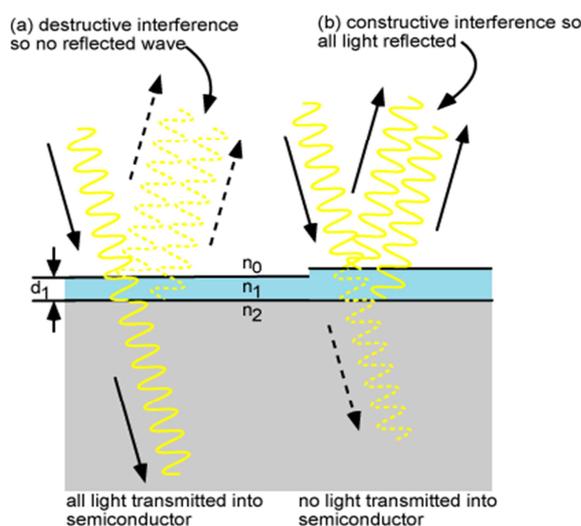


Figura 19: ARC di spessore ottimale (sinistra), il cui dielettrico possiede una lunghezza d'onda di un quarto rispetto ai raggi incidenti: i raggi vengono trasmessi all'interno della cella. ARC senza spessore ottimale (destra): i raggi vengono riflessi all'esterno [27].

Lo spessore del rivestimento è scelto in base alla lunghezza d'onda del raggio incidente, ossia la lunghezza d'onda del materiale dielettrico deve essere un quarto di quella dei raggi incidenti sulla superficie. Per un materiale trasparente con indice di rifrazione \hat{n}_1 (1.3) e lunghezza d'onda della luce incidente calcolata nello spazio λ_0 , lo spessore d_1 adatto al ricoprimento della cella, per minimizzare la riflessione, risulta:

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4\hat{n}_1} \quad (2.1)$$

La riflessione può essere ulteriormente ridotta se l'indice di rifrazione (1.3) dell'ARC ha un valore pari alla media geometrica degli indici di rifrazione \hat{n}_0, \hat{n}_2 , appartenenti ai materiali a contatto con esso (ovvero vetro o aria e semiconduttore):

$$\hat{n}_1 = \sqrt{\hat{n}_0 \hat{n}_2} \quad (2.2)$$

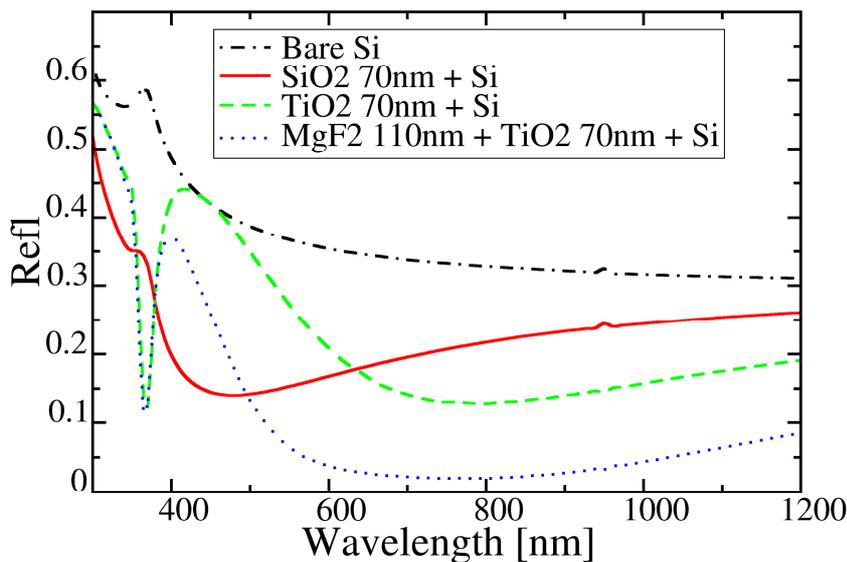


Figura 20: Grafico rappresentante la riflessione della luce da una cella in silicio senza ARC (tratteggio nero) e con due ARC differenti: in ossido di silicio e in ossido di titanio, di ugual spessore. Infine (tratteggio blu) la minor riflessione è provocata da un doppio ARC.

Per una cella in silicio con la superficie anteriore a contatto con l'aria ($\hat{n}_{si} \approx 3.8$), l'indice di rifrazione ottimale è dato dalla sua radice quadrata ($\hat{n}_{opt} \approx 1.9$).

Nella Figura 20 sono rappresentati alcuni esempi relativi agli andamenti di riflessione di silicio cristallino, in base alla lunghezza d'onda incidente, senza copertura, con un *single layer anti-reflection coating* (SLARC) di diossido di silicio (SiO_2) di spessore di 70nm e di diossido di titanio (TiO_2) del medesimo spessore: a circa 600nm l'ARC di SiO_2 riflette molto meno rispetto al TiO_2 .

La tecnica più comune per una misurazione precisa dello spessore dell'*antireflection coating* è quello di utilizzare l'ellissometria, dalla quale si definisce la variazione dello stato di polarizzazione di un fascio di luce: ciò permette di caratterizzare l'indice di rifrazione e lo spessore del film. Il colore della pellicola funge da guida approssimativa per la determinazione dello spessore [27].

Nel caso in cui la lunghezza d'onda del dielettrico non rispetti il precedente parametro (2.1), la riflessione aumenta, rimanendo comunque sempre al di sotto di un eventuale valore dato da una cella priva di ARC o, al più, eguagliando tale risultato. Lo spessore è progettato per rimanere nei valori intorno a 600nm, dove il flusso di fotoni risulta massimo nello spettro solare. A tale misura coincide l'indice di rifrazione del rivestimento pari a 2.4, nel caso si voglia portare a zero la riflessione [26].

Il relativo coefficiente di riflessione R per una cella senza rivestimento anti riflesso è dato dalla (1.2). Per uno strato singolo, trascurando l'assorbimento di luce da parte del semiconduttore, R diviene:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\beta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\beta} \quad (2.3)$$

dove

$$r_1 = \frac{\hat{n}_0 - \hat{n}_1}{\hat{n}_0 + \hat{n}_1} \quad (2.4)$$

$$r_2 = \frac{\hat{n}_1 - \hat{n}_2}{\hat{n}_1 + \hat{n}_2} \quad (2.5)$$

e

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \hat{n}_1 d_1. \quad (2.6)$$

Quando $\hat{n}_1 d_1 = \lambda_0/4$, il coefficiente di riflessione assume il valore minimo:

$$R_{min} = \left(\frac{\hat{n}_1^2 - \hat{n}_0 \hat{n}_2}{\hat{n}_1^2 + \hat{n}_0 \hat{n}_2} \right)^2 \quad (2.7)$$

ed è uguale a zero se è valida la (2.2).

Il coefficiente di trasmissione invece risulta sia in presenza o meno di un singolo strato di ARC:

$$T = 1 - R \quad (2.8)$$

Oltre ad avere un indice di rifrazione coerente con quanto esposto, il materiale del rivestimento deve essere trasparente. È usualmente utilizzato uno strato nano cristallino o amorfo che previene le dispersioni della luce, formato grazie a evaporazione sotto vuoto che tende ad assorbire i raggi UV [10] [22].

L'industria utilizza soprattutto TiO_x (ossido di titanio) depositandolo attraverso vapore chimico (*chemical vapor deposition, CVD*); vi sono casi in cui invece si utilizza come ARC una lastra di $SiN_x:H$. Un esperimento [28] ha dimostrato che, tramite un rivestimento di $SiN_x:H$ su texture piramidali di altezza pari a $1\mu m$, è possibile ottenere una riflessione pari a zero nel caso in cui sia valida la (2.1), dove l'indice di rifrazione e lo spessore sono quelli relativo al materiale dell'ARC, che deve essere uguale a $\hat{n}_{AR} = \sqrt{\hat{n}_{Si}}$. Lo strato di $SiN_x:H$ ottimale richiede uno spessore molto piccolo di c-Si, circa $50\mu m$ [28].

È possibile ridurre ulteriormente la riflessione, aggiungendo un secondo strato di ARC (*double layer anti-reflection coating, DLARC*). La figura sottostante (Figura 21) conferma quanto appena affermato.

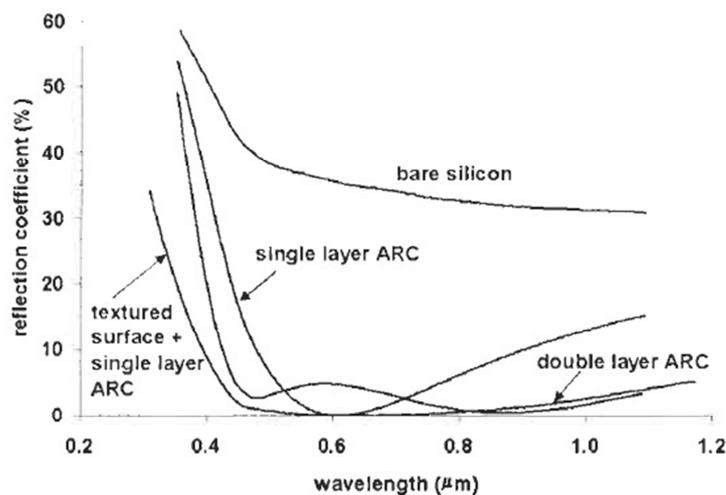


Figura 21: Rappresentazione grafica dell'andamento del coefficiente di riflessione, in presenza di una cella priva di ARC, di ARC singolo e DLARC. E' inoltre presentata la curva per una cella a singolo ARC e testurizzazione [22].

Per quanto riguarda l'equazione dell'indice di riflessione del DLARC, risulta molto più complessa rispetto a quella ad un singolo strato:

$$R = \frac{r_0^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_0^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_0 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\beta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_0^2) \cos 2\beta_2 + 2r_0 r_3 \cos 2(\beta_1 + \beta_2) + 2r_0 r_2^2 r_3 \cos 2(\beta_1 - \beta_2)}{1 + r_0^2 r_2^2 + r_0^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_0 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\beta_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_0^2) \cos 2\beta_2 + 2r_0 r_3 \cos 2(\beta_1 + \beta_2) + 2r_0 r_2^2 r_3 \cos 2(\beta_1 - \beta_2)} \quad (2.9)$$

Alcune celle in commercio riescono ad abbattere la riflessione della luce fino al 4%.

Il DLARC che trova maggiore impiego è lo solfuro di zinco (ZnS) insieme a fluoruro di magnesio (MgF_2) o al nitruo di silicio. Tuttavia, quest'ultimo risulta molto costoso per celle commerciali [29]. In Figura 20 si può notare il *double layer anti-reflection coating* formato da fluoruro di magnesio (110nm) e TiO_2 (70nm). Questa tipologia di copertura è quella che minimizza la riflessione nell'intervallo di lunghezza d'onda considerata.

2.2 PASSIVAZIONE DELLA SUPERFICIE POSTERIORE (REAR SURFACE)

La passivazione è un processo di natura elettrochimica che consente, nel caso del silicio e quindi nel fotovoltaico, di ridurre l'effetto di ricombinazione attraverso l'adesione di un film sottile sul metallo, posto nella superficie posteriore, generalmente composto da nitruo di silicio, ossido di silicio o diossido di titanio.

La semplicità della passivazione della superficie rappresenta uno dei vantaggi maggiori che ha portato la tecnologia del silicio alla dominazione della microelettronica. Sfortunatamente però, per quanto riguarda le celle solari passivate tramite ossido di silicio, l'indice di rifrazione risulta molto basso per l'utilizzo nel processo di anti riflessione della copertura. Difatti, se è presente nella superficie superiore, questo limita l'abilità di ridurre la riflessione a causa di successive deposizioni di strati. Di conseguenza, se viene utilizzato ossido nello strato superficiale come possibile passivazione, è necessario moderare lo spessore di quest'ultimo.

Attorno al 1978, due eventi dimostrarono l'importanza di questo tipo di film nel fotovoltaico. Il primo fu l'esperimento tramite applicazione di un sottile strato di ossido nei diodi tunnel MIS (*metal-insulator-semiconductor*) per la conversione di energia. Posto tra i contatti metallici superiori disposti a griglia e tra la superficie soprastante ad un piano non dopato, venne depositato lo strato di ossido, mentre un piano anti riflessione, con alta densità di carica, fu posizionato sulla sommità del dispositivo. In questo caso, lo spessore dell'ossido era di dimensioni molto ridotte, circa 2nm, per consentire l'effetto tunnel tra il contatto e il substrato. Il notevole vantaggio fu quindi l'ottenimento di alta tensione di circuito aperto (650mV), raggiunta per la prima volta con il silicio. Simili celle furono poi commercializzate in seguito. Anche i *Sandia Laboratories* [30] convinsero l'industria fotovoltaica dei benefici apportati dalla passivazione. Fu messa a punto una struttura formata da una giunzione, tramite l'aggiunta della tecnica di *gettering* posteriore n^+ (*p-n- n⁺ junction*) di fosforo, della diffusione superficiale di boro e di deposizione al plasma di nitruo di silicio per lo strato anti riflessione.

Senza l'ossido passivato, la cella possedeva un'efficienza del 15-16%, mentre con l'aggiunta di quest'ultimo, i valori aumentavano fino al 16.8%. Il risultato ottenuto fu un gran successo, che portò poi all'evoluzione di questa tecnica per diversi tipi di celle.

I primi approcci per la passivazione, oltre all'ossido menzionato, furono fatti isolando i contatti posteriori dai portatori minoritari, tramite una regione molto dopata, chiamando questo effetto "*back surface field*" (BSF, ossia un campo elettrico che impedisce alle cariche minoritarie di raggiungere i contatti in questione). Nelle celle MINP e PESC (Paragrafo 1.4) fu infatti adottato uno strato p^+ posto al di sopra dei contatti inferiori [25].

Dal momento che la tendenza dell'industria è orientata verso la produzione di celle in wafer sottile, la ricombinazione nello strato posteriore gioca un ruolo molto importante nelle celle in silicio mono e multi cristallino. Di conseguenza, al giorno d'oggi, nella maggior parte delle strutture dei dispositivi fotovoltaici, la passivazione della *rear surface* viene effettuata unendo una maschera in alluminio al silicio, che insieme formano una lega eutettica, alla temperatura di 577°C. La regione di fusione dell'Al-Si agisce come dissipatore di impurità, dando luogo all'effetto di *gettering* [22]. Durante il raffreddamento, il silicio ricristallizza e viene dopato con alluminio, al suo punto limite di solubilità, ad una determinata temperatura, creando uno strato di p^+ *back surface field* (Figura 22). Il processo di ricombinazione può diminuire fino a 200cm/s nel caso in cui uno strato di alluminio di circa 20µm sia stampato e riscaldato ad una temperatura di 800°C per circa 5 minuti. Tale fase può provocare però una deformazione del wafer con la conseguenza di scarsi rendimenti meccanici, nel caso in cui il substrato utilizzato sia particolarmente sottile. Il p^+ *back surface field* può essere creato anche mediante evaporazione dello strato di alluminio e sinterizzazione per alcune ore a temperature altissime. In questa maniera i difetti del wafer vengono ridotti, ma la velocità di ricombinazione aumenta a 1000cm/s.

Una passivazione alternativa, che rimanda alla struttura delle celle PERL (Figura 16), è il processo di localizzazione della *back surface field*. In questa tipologia, la maggior parte della *rear surface* viene passivata tramite accrescimento termico di ossido, mentre l'elettrodo posteriore ricopre solo l'1-4% dell'intera area posteriore.

Infine, una tecnica che sta emergendo di recente, è la passivazione mediante giunzione flottante. Viene creata una giunzione di tipo n^+ polarizzata direttamente: nella teoria ciò dovrebbe conferire una passivazione non fortemente dipendente dalla velocità di ricombinazione che avviene nella parte inferiore della cella. Per quanto riguarda la griglia dei relativi contatti posteriori, vengono costruiti per mezzo di una maschera stampata di argento o alluminio, dopodiché vengono create scanalature fatte con il laser, diffusioni di boro e placature.

Di seguito (Figura 22) sono rappresentate le tre diverse strutture passivate della *rear surface*.

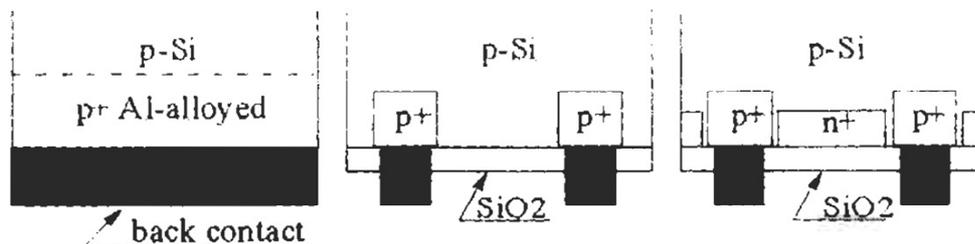


Figura 22: Rappresentazione schematica di differenti strutture della superficie posteriore: (da sinistra a destra) lega di alluminio BSF, diffusione locale BSF e giunzione flottante [22].

2.3 TEXTURING PER CELLE "THICK WAFER" IN *c-Si*

Per massimizzare la tensione di circuito aperto di una cella solare, è necessario minimizzare il fenomeno di ricombinazione che avviene in tutta la cella, attraverso la diminuzione del volume di essa. Ma ciò provoca un chiaro abbassamento delle performance del dispositivo, che appunto deve essere contrastato attraverso le tecniche di *light trapping*. Con una tecnica mirata di *light trapping* la luce ha quindi maggiori possibilità per poter essere assorbita: la presenza di uno strato di alluminio posteriore alla cella, permette la riflessione all'interno di essa della luce, così il cammino che questa compie non è uguale allo spessore ma, se siamo in presenza di un buona struttura di *light trapping*, il percorso aumenta fino a 50 volte lo spessore della cella [31].

In Figura 23 vengono illustrati esempi molto generici che spiegano al meglio il comportamento dei fotoni, con l'intervento o meno di *texturing* e *light trapping*, lungo la sezione della cella.

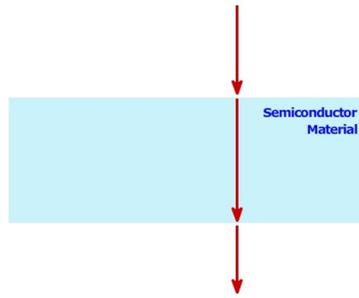


Figura 23 (a): In un wafer senza superficie testurizzata o un piano posteriore riflettente, la luce attraversa la cella solare una sola volta e fuoriesce dalla parte opposta [31].

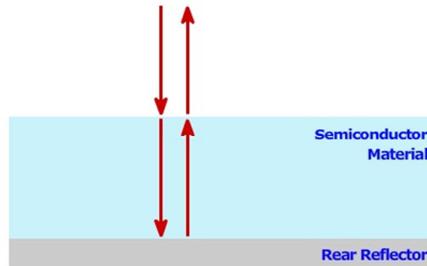


Figura 23 (b): Quando invece viene posta una piastra posteriore riflettente, la lunghezza del percorso ottico diviene il doppio dello spessore del dispositivo [31].

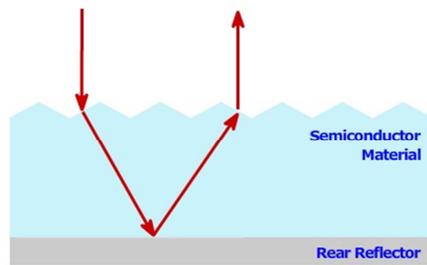


Figura 23 (c): La texturing sulla superficie il alto incrementa la lunghezza del percorso della luce, ma quest'ultima fuoriesce dopo due passaggi [31].

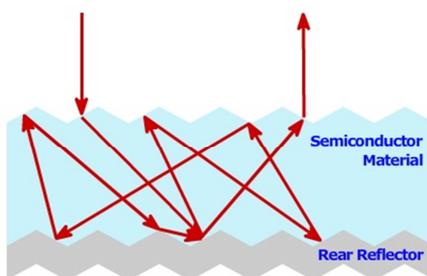


Figura 23 (d): Le più semplici tecniche di light trapping consentono molteplici passaggi all'interno della cella, incrementando le probabilità di assorbimento dei fotoni [31].

Le tecniche di *light trapping* presenti nella letteratura sono principalmente due: lo schema di randomizzazione o *Lambertian reflector* e lo schema di *light trapping* geometrico.

2.3.1 LAMBERTIAN REFLECTOR

Il primo caso è basato sulla randomizzazione della direzione della luce nel semiconduttore. Per essere catturati, i fotoni non devono “rimbalzare” sulla superficie della cella, perciò il raggio luminoso deve colpire lo strato di silicio con un’angolazione che segue la regola $\arcsin\left(\frac{1}{\hat{n}}\right)$, dove \hat{n} rappresenta in questo caso l’indice di rifrazione del silicio, e l’angolo in questione è di circa 16-17° [25]. Lo schema *Lambertian reflector* riflette la luce, attraverso lo strato posteriore, in ogni direzione (random), senza considerare l’angolo di incidenza di origine. L’intensità radiante riflessa varia in base al $\cos(\theta)$, dove θ è l’angolo tra la direzione di osservazione e la normale alla superficie di riflessione della luce [25]. Il percorso casuale che segue la luce nel dispositivo riduce la trasmissione dei fotoni attraverso la superficie posteriore, ma soprattutto aumenta in modo significativo la riflessione totale interna; se i fotoni superano l’angolo critico quando incontrano nuovamente la superficie anteriore, questi rimbalzano all’interno della cella verso la parte opposta. In tale maniera, l’assorbimento della luce può essere aumentato, poiché il cammino ottico dei fotoni può crescere fino a un fattore $4\hat{n}^2$ [32]: questo limite geometrico del *light trapping* è chiamato *Yablonovitch limit*, e permette di allungare il percorso dei fotoni fino a 50 volte lo spessore della cella. Il valore del parametro è ricavato dall’approssimazione del fattore di miglioramento della lunghezza di percorso B :

$$B = 4\hat{n}^2 - 2 \quad (2.10)$$

Il *Lambertian reflector* è mostrato nella figura sottostante.

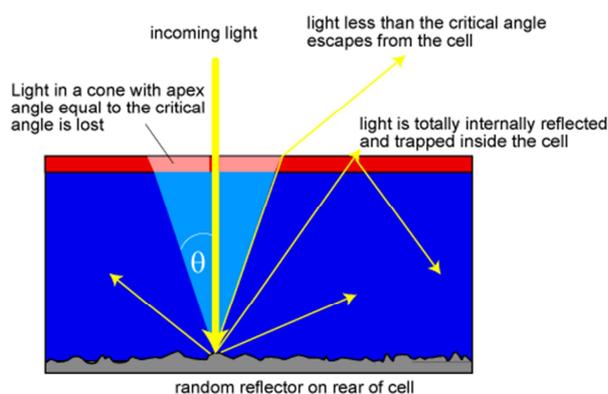


Figura 24: Il *light trapping* utilizza un riflettore casuale posto nella superficie posteriore della cella. Se l’angolo di incidenza è inferiore all’angolo critico, allora la luce viene riflessa al di fuori della cella, altrimenti continua il suo percorso all’interno di quest’ultima [32].

La precedente espressioni si riferisce a riflettori posteriori perfetti; con una lastra posteriore variabile in riflettanza R , il fattore B (2.10) diviene invece:

$$B = \frac{2(1+R)}{1-R\left(1-\frac{1}{\hat{n}^2}\right)} \quad (2.11)$$

da cui il valore della riflettanza richiesto per mantenere una frazione f di capacità di intrappolamento di luce nel caso ideale è

$$R > \frac{2f\hat{n}^2-1}{2f(\hat{n}^2-1)+1} \quad (2.12)$$

È possibile raggiungere una riflettanza posteriore maggiore del 91%, interponendo uno strato dielettrico tra il semiconduttore di silicio e il metallo. Nella seguente Figura 25 sono presentati valori di riflettanza ad una lunghezza d'onda di $1.2\mu\text{m}$:

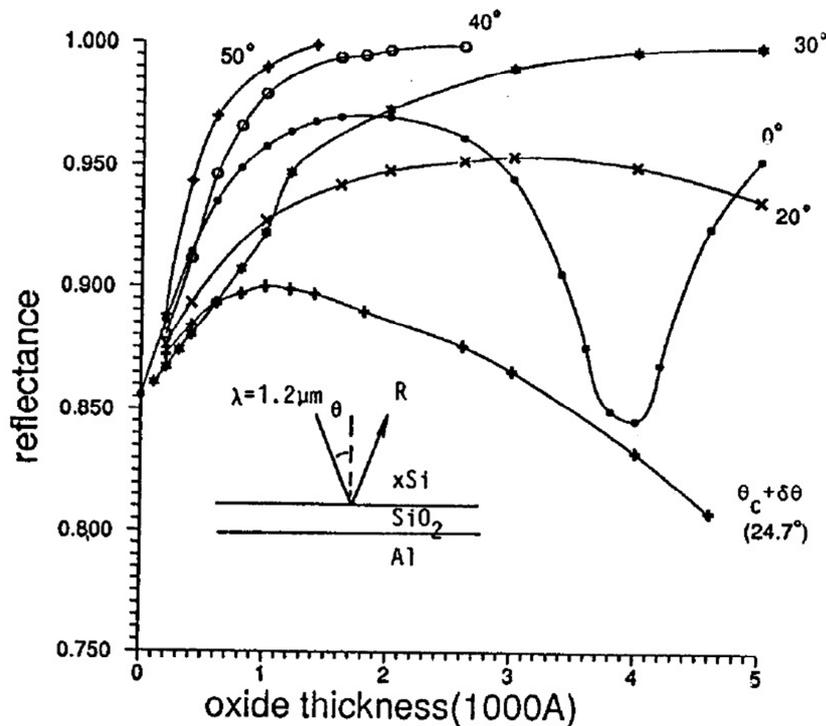


Figura 25: Grafico dei valori di riflettanza calcolati per la lastra posteriore di alluminio di silicio, in funzione dello spessore di SiO₂, per un angolo di incidenza interno variabile. In particolare, se l'angolo coincide con $\theta_c + \delta\theta$ e lo spessore dell'ossido è di 1mm, la riflettanza raggiunge il minimo valore [25].

Quindi in base all'angolo critico abbiamo valori più o meno ragionevoli di riflettanza: al di sotto di esso, dominano effetti ciclici di interferenze, mentre al di sopra, il parametro in oggetto, si avvicina al 100%, aumentando l'altezza dell'ossido. La riflettanza è minima in corrispondenza dell'angolo critico [25].

Sempre restando nell'ambito delle celle solari a silicio cristallino, per realizzare un valore di assorbimento appropriato, lo spessore del silicio deve essere superiore a $100\mu\text{m}$. Si può verificare facilmente che, non utilizzando alcuna tecnica di *light trapping*, il volume ottimale della cella deve aumentare fino a $200\mu\text{m}$, cosa che invece può essere evitata con l'utilizzo di strutture apposite per l'intrappolamento della luce. Difatti, nel diagramma riportato di seguito, è possibile comparare la curva di assorbimento relativa ad uno spessore di $200\mu\text{m}$ dello strato di silicio senza testurizzazioni, con quella ad uno spessore di $20\mu\text{m}$ che include la tecnica di *light trapping*.

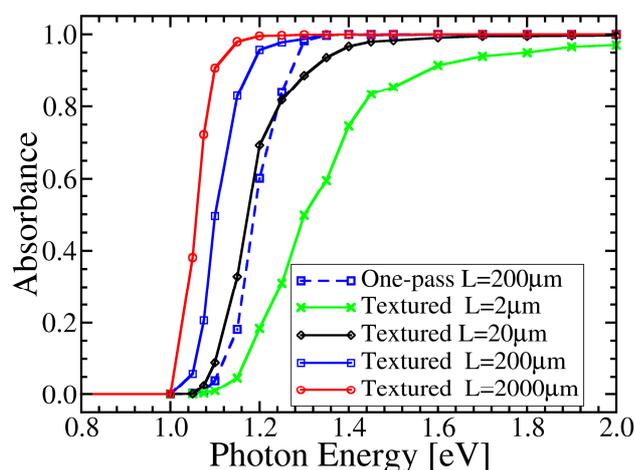


Figura 26: Diagramma rappresentante le curve di assorbimento della cella, in assenza di texture (linea blu tratteggiata), e in presenza di tecniche di *light trapping*. La curva rossa, con valori di assorbimento alti a bassa energia del fotone, indica una testurizzazione di $2000\mu\text{m}$.

Nella tecnica appena presentata appaiono però alcuni limiti per quanto riguarda la risposta isotropa, ossia la cella provvista dello schema *Lambertian* concede gli stessi risultati in base a diverse angolazioni di incidenza della luce. Dal momento che la direzione dei raggi può essere stimata anticipatamente, l'isotropia della cella si pone come limite, e conseguentemente la risposta non è ottimale.

2.3.2 GEOMETRICAL LIGHT TRAPPING

Nel *light trapping* geometrico, la struttura viene costruita all'interno della regione del bulk, che permette di direzionare la luce verso la superficie anteriore della cella. Questa tecnica non risente dei limiti isotropi del *Lambertian reflector*, difatti è stata progettata per ricevere la luce perpendicolarmente, esibendo prestazioni superiori alla precedente rispetto al range di angoli di incidenza che si avvicinano all'ortogonale.

2.3.2.1 GEOMETRIE BIDIMENSIONALI: V-GROOVE

Il funzionamento, proposto da Redfield [33] è molto semplice: come si evince dalla Figura 27, lo strato posteriore della cella non è orizzontale ma obliquo, e ciò permette alla luce di rimbalzarsi contro e tornare indietro con angolazione diversa. Nel caso peggiore, il numero minimo di passaggi previsti all'interno della cella sono quattro, che possono aumentare in base alla posizione della superficie posteriore. La pendenza richiesta è comunque piuttosto piccola. Per mantenere uno spessore ovviamente finito della cella, lo svantaggio che si propone è così esplicito: se un fascio di onde luminose, che colpisce una faccia obliqua, incrementa l'inclinazione degli angoli con la superficie anteriore, garantendo quindi una riflessione totale interna al dispositivo, la faccia opposta decrementa questa inclinazione, portando in pochi passaggi all'espulsione dei fotoni dalla cella.

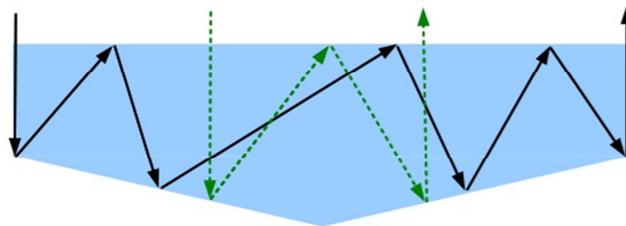


Figura 27: Percorso dei raggi, col metodo proposto da Redfield, in funzione della loro posizione di incidenza sulla superficie posteriore [25].

La lunghezza del percorso ottico effettuato dalla luce nello spessore della cella, dipende quindi dal punto in cui essa viene ad incidere nel piano obliquo. Il punto, o meglio, l'insieme dei punti tali per cui si hanno il numero massimo di passaggi interni si chiamano *sweet spots*, e si trovano in un'area ben precisa. Naturalmente, all'aumentare della lunghezza del percorso, l'area dove risiedono i punti in oggetto diviene una porzione più limitata. Il numero medio di passi che i

fotoni intrappolati riescono a compiere è compreso tra 4 e 15, comunque generalmente più basso rispetto allo schema random.

Una seconda importantissima geometria bidimensionale è presentata di seguito. In questo caso non vengono apportati cambiamenti al piano posteriore, ma si creano scanalature verticali simmetriche, attraverso l'intersezione con il piano cristallografico, chiamate *upright slats* o *groove*. Viene modificata quindi la superficie anteriore, in quanto è facile dimostrare che un piano eterogeneo riflette una minor quantità di luce rispetto ad un piano uniforme e, le conseguenze più evidenti, sono l'aumento della densità di corrente di corto circuito o la riduzione dello spessore della cella, mantenendo la stessa J_{SC} . Nel secondo caso la tensione di circuito aperto accresce, e il volume rimpicciolito limita l'effetto della ricombinazione nel bulk. In ogni caso si ha un miglioramento delle prestazioni. Le celle Vertical groove o V-groove sono formate da una serie di prismi a base triangolare orizzontali e da triangoli isosceli nella sezione trasversale (Figura 28).



Figura 28: Particolare delle celle V-groove: a sinistra si trova la superficie alta della cella, a destra la sezione trasversale [34].

Nel caso generale, la luce, come si può notare visivamente dalla Figura 29 in alto, compie un viaggio molto breve, appena due passaggi, all'interno del dispositivo. Un aumento della lunghezza del percorso può avvenire eliminando la simmetria e inclinando leggermente i solchi. In tale maniera si ottiene un incremento significativo e un miglioramento del *light trapping* (Figura 29 in basso).

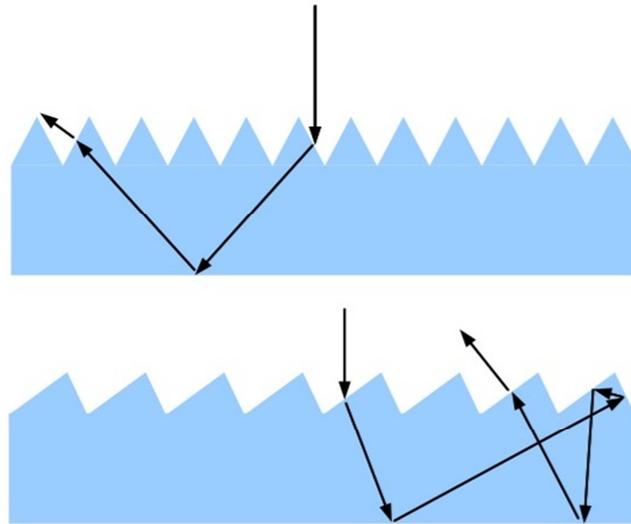


Figura 29: Light trapping mediante texture V-groove con scanalature non oblique (in alto) e oblique (in basso) [25].

Un'idea diversa è quella di porre dei contatti metallici lungo la scanalatura, il modo tale che i raggi luminosi vengano riflessi sulla superficie simmetrica ad essa (Figura 30): ciò si traduce in un aumento delle prestazioni a livelli di concentrazione alti. Ma lo svantaggio è dato dall'area dei contatti molto grande, che limita la tensione di circuito aperto. Per perfezionare questo modello è necessario ridurre lo spazio utilizzato dai contatti, aumentando però la complessità dei processi di lavorazione [25].

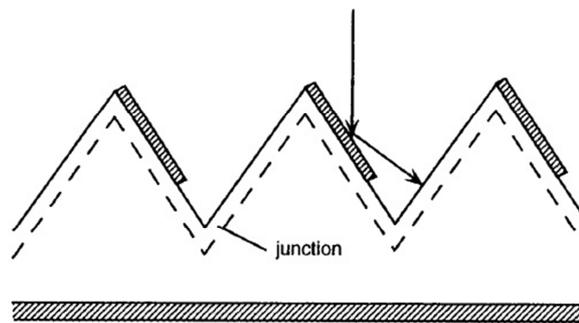


Figura 30: Cella solare con V-groove nella quale la luce incidente viene riflessa dal contatto metallico nella faccia della scanalatura adiacente. [25]

Una simulazione compiuta dall'*Università Periyar* in India [35], dimostra che si può conquistare il 40% in più di assorbimento di fotoni tramite celle al silicio con *groove* larghe $2.0\mu\text{m}$ e alte $1.5\mu\text{m}$. Le celle utilizzate possiedono uno spessore di $200\mu\text{m}$, le scanalature sono progettate tramite attacco chimico con una soluzione di KOH (idrossido di potassio). Vi sono inoltre delle microlenti, fabbricate in

quarzo, che permettono di concentrare il fascio di luce su un punto delle scanalature. Le resistenze in serie della cella vengono minimizzate, grazie alla larghezza dei contatti metallici, che quindi aumentano la generazione di corrente. Procedendo con questa descrizione, si andrà a studiare in dettaglio gli effetti provocati dalle differenti dimensioni delle *groove*.

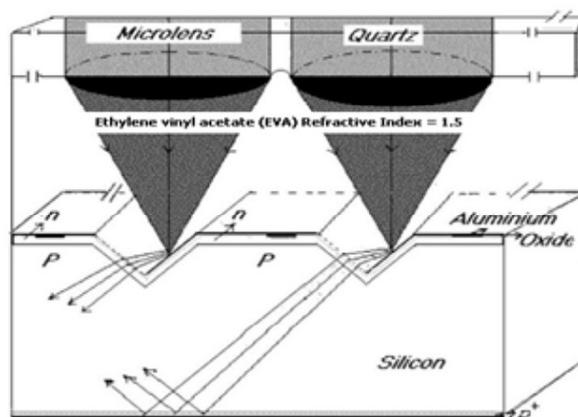


Figura 31: Schema del modello V-groove di una cella solare, nella quale la luce viene guidata tramite una serie di microlenti [35].

Nel caso della cella testurizzata, l'onda incidente viene generata in modo tale per cui riesca ad entrare nella struttura: la distanza tra un dente e l'altro (*pitch*) è il parametro che determina maggiormente l'esito dell'esperimento. In tale esempio si è inoltre posto costante il rapporto tra la distanza citata e l'altezza delle *groove*, questo poiché differenti strutture forniscono differenti dimensioni di area esposta ai raggi solari.

Il problema che si pone ora, è la definizione delle grandezze delle scanalature che possono assicurare un percorso di intrappolamento della luce maggiore, rispetto ad altre. La determinazione della lunghezza è molto difficile da prevedere con questo modello, perciò si è utilizzato un programma che misura il percorso seguito dai raggi luminosi, quando questi colpiscono la superficie del dispositivo. Il risultato è rappresentato dalla distanza effettuata dai raggi intrappolati, calcolata raddoppiando il numero di riflessioni interne completate. Dalla Figura 31 si osserva che il vantaggio per questo modello risiede nell'ampia capacità di *light trapping*, rinforzata grazie al ricoprimento di alluminio di gran parte della superficie anteriore della cella, ad eccezione dell'area dove avviene la rifrazione dei fotoni nel silicio. I fotoni possono quindi essere assorbiti o nel primo passaggio, oppure in quelli successivi. La sorgente luminosa viene poi spostata sulla superficie posteriore, quindi la luce colpisce quest'ultima e continua a viaggiare verso la faccia opposta. Ciò prova che la lunghezza del percorso interno non dipende dalla struttura della superficie. Mediante l'inclinazione della

sorgente di circa 10 gradi, si può osservare che i fotoni rimbalzano sulla superficie anteriore con la medesima pendenza. Utilizzando quest'angolo, vengono inviati raggi luminosi verso la cella e alla fine del processo sono poi registrati il numero totale di rimbalzi. La stessa procedura viene impiegata anche con altre inclinazioni, fino a raggiungere i 90 gradi. La Figura 32 dimostra che vi è una dipendenza dalla larghezza del passo tra una scanalatura e l'altra: aumentandola, decrementa il rapporto di massimo assorbimento tra il livello di altezza e larghezza. Questo perché il punto delle *groove* adatto all'intrappolamento della luce, si trova vicino alla parte più bassa della scanalatura. Riducendo quindi il rapporto massimo di assorbimento, i parametri caratterizzanti la *V-groove* si restringono, spostando la regione di concentrazione dell'energia lontano dalla parte inferiore delle *groove*.

Per un passo di $2.0\mu\text{m}$ di larghezza e $1.5\mu\text{m}$ di altezza della struttura di *light trapping*, si incrementa il massimo assorbimento con l'aumento della lunghezza d'onda della luce (Figura 33).

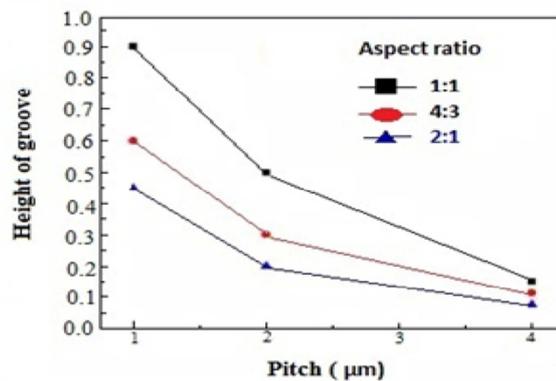


Figura 32: Dipendenza del rapporto di massimo assorbimento tra l'altezza delle scanalature e la loro larghezza [35].

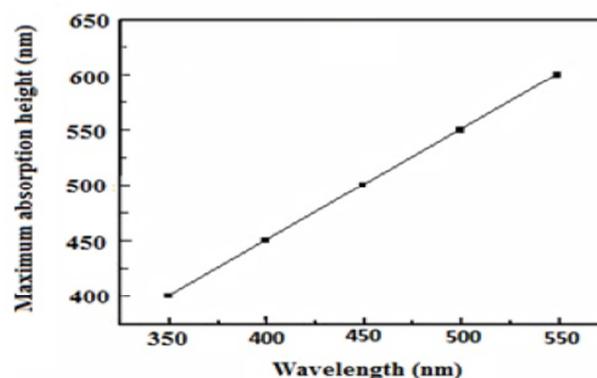


Figura 33: Variazione dell'altezza di massimo assorbimento, in base alla lunghezza d'onda, relativa a groove di $2.0\mu\text{m}$ di larghezza e $1.5\mu\text{m}$ di altezza [35].

Per celle solari esposte alla quasi totalità della luce solare, è importante tenere presente i diversi angoli di incidenza dei raggi luminosi per contrastare eventuali dissipazioni di energia. La figura sottostante (Figura 34), suggerisce che le dimensioni prese finora in considerazione (*pitch* di $2.0\mu\text{m}$ e altezza di $1.5\mu\text{m}$) sono molto vantaggiose rispetto ad una superficie piana, perché permettono una diminuzione dell'assorbimento molto più lenta, aumentando l'angolo di incidenza, mentre la superficie planare (valori rappresentati da quadrati) tende ad avere una curva molto più brusca.

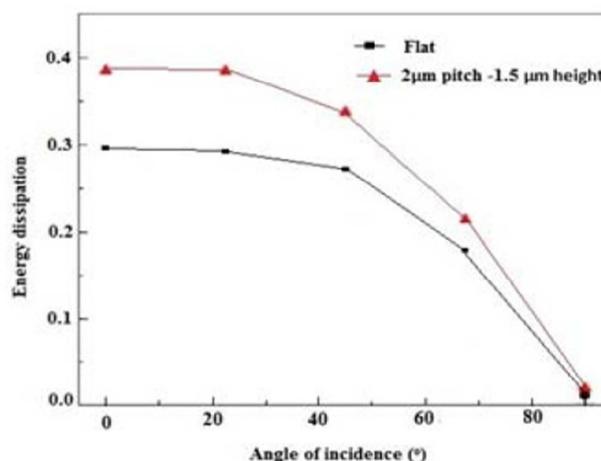


Figura 34: Dissipazione di energia come frazione di potenza incidente [35].

Infine si sono comparati due tipi di strutture molto differenti, la prima caratterizzata da V-groove e la seconda di tipo planare, e si è potuto constatare che le prime aumentano largamente l'assorbimento della cella. [35]

Nel caso delle V-groove se le superfici della groove sono parallele tra di loro, la luce, internamente alla cella, può incrementare il numero di passaggi fino a 4, colpendo le superfici della stessa groove; in caso contrario, la situazione migliora ulteriormente (Figura 35).



Figura 35: Tecnica di light trapping con V-groove, formata da un doppio strato parallelo alle stesse groove [25].

In tale maniera si ottengono dei benefici, tra cui la possibilità di catturare nuovamente i raggi luminosi che si erano allontanati dalla cella e la richiesta di una più scarsa differenza di orientamento cristallografico tra le superfici superiore e inferiore, tale da soddisfare la riflessione totale interna, a discapito però di un range molto piccolo di angoli che possono essere accettati [25].

2.3.2.2 GEOMETRIE TRIDIMENSIONALI: PYRAMIDS, TILER'S PATTERN, PERPENDICULAR GROOVES

Sostituendo la testurizzazione a *V-groove* con quella a piramidi a base rettangolare, aumentano le possibilità di intrappolamento dei fotoni all'interno della cella. Le diverse tipologie di piramidi che verranno discusse in seguito, sono formate da incisioni anisotrope sui wafers iniziali, ottenendo quattro piani che, nel caso della struttura regolare, sono equivalenti [25]. Un vantaggio ottenuto mediante queste tecniche è sicuramente dato dalla riflessione verso il basso della luce incidente sui lati delle piramidi, che accresce le probabilità di intrappolamento. La maggior parte della luce viene intrappolata la prima volta che incide sulla struttura: nel caso in cui si utilizzi un wafer con orientazione cristallografica (100), e che questo venga tagliato con una diversa orientazione (111), la luce allora può essere rifratta all'interno, con un'angolazione di 48° rispetto all'angolo iniziale, delineando una maggiore lunghezza del percorso di un fattore 1.35 rispetto alle celle prive di texturing [22].

Nella figura sottostante viene messo in evidenza l'*image region* delle *regular upright pyramid*, ossia la regione colpita dai fotoni incidenti relativa ad una struttura a piramidi regolari. Ovviamente la porzione di piramide sulla quale i raggi luminosi urtano ripetutamente, dipende dalla geometria della particolare texture adottata, in particolare, per una geometria regolare, dal rapporto tra la grandezza delle piramidi e la larghezza del wafer.

Da notare che, se la luce rifratta nel substrato colpisce i piani laterali, allora questa continuerà il proprio viaggio all'interno della cella; nel caso in cui invece riemerge sul piano di orientamento opposto a quello di incidenza, verrà espulsa dal dispositivo.

Di seguito (Figura 36) è rappresentata una texture a piramidi regolari.

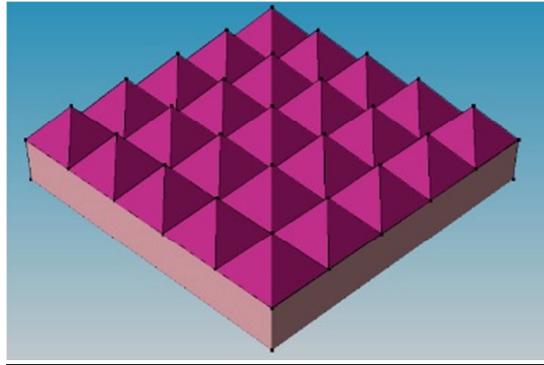


Figura 36: Texture a piramidi regolari upright.

Come per le *groove*, un'altra tecnica di intrappolamento dei fotoni con conseguente migliore nelle prestazioni, è quella di rendere oblique le piramidi. Le *tilted pyramids*, essendo piegate nella terza dimensione, offrono maggiori benefici, aumentando il numero di passaggi, dei raggi intrappolati, nella sezione della cella e diminuendo la riflessione anteriore, nel caso in cui la cella venga incapsulata col vetro.

Si possono trovare inoltre layout di piramidi randomizzate, ossia le dimensioni, l'orientamento e la disposizione sul piano sono casuali. Le performance aumentano rispetto alle *regular upright pyramid*, ma lo svantaggio risiede nella difficoltà del controllo nel processo di costruzione della geometria stessa.

Per favorire l'aumento della regione immagine, e quindi la possibilità di allungare il percorso dei fotoni all'interno della cella, viene utilizzato il modello a piastrelle o *tiler's pattern*. In questo schema (Figura 37), le piramidi, se osservate dall'alto, sono tutte sfasate tra di loro: ciò si traduce in un aumento delle performance, che si avvicina a quello dello schema *Lambertian*, superando sicuramente l'efficienza degli altri modelli a piramidi (*regular* e *random*). Tuttavia, è sempre utile dal punto di vista ingegneristico, considerare il caso peggiore, nel quale appunto ci si aspettano prestazioni uguali alla peggior geometria di piramidi regolari. Nonostante quest'ultima osservazione, il *tiler's pattern* viene utilizzato per le celle in silicio ad alte prestazioni.

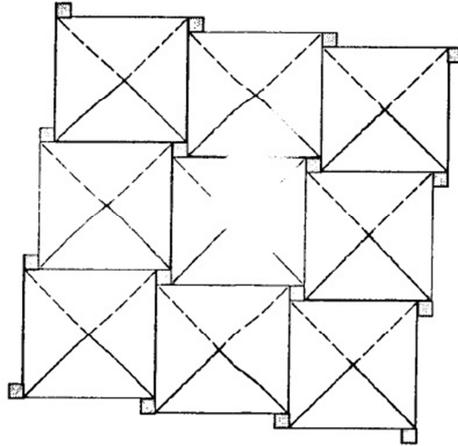


Figura 37: Texture con il tiler's pattern, che favorisce una maggiore image region [25].

Prestazioni ancora migliori possono essere ottenute con l'aggiunta di una struttura *light trapping* anche nella parte inferiore della cella (*double-side light trapping*). Una di queste è la cella a *perpendicularly groove* (Figura 38). Le scanalature poste nella parte posteriore della cella favoriscono le riflessioni nella terza dimensione, limitandone notevolmente la potenziale uscita dalla cella.

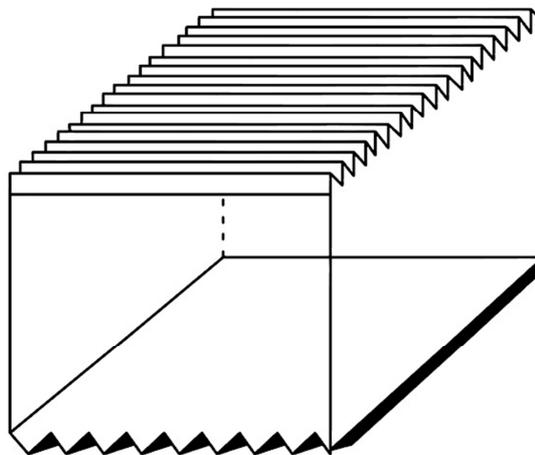


Figura 38: Schema di una cella con tecnica *perpendicularly groove* [26].

Questa struttura mostra prestazioni potenzialmente superiori a quelle dello schema *Lambertian* per incidenza perpendicolare di raggi. Interessante è determinare se questo miglioramento va a discapito della riduzione di sensibilità angolare. La cella *perpendicularly groove* non è infatti sensibile alle angolazioni perpendicolari. Inoltre, con una struttura della superficie inferiore, si ha sicuramente una moltiplicazione delle riflessioni dei fotoni, prima che questi tornino dall'altra parte della cella. Ciò riduce notevolmente la riflettanza della

superficie posteriore. L'incremento dell'area crea problemi anche per la relativa passivazione. Queste condizioni sfavorevoli hanno di fatto portato a privilegiare l'utilizzo di tecniche con superfici planari inferiori.

Di seguito vengono raffigurate le percentuali di passaggi all'interno della cella, relative alle tecniche *double-side* (Figura 39) e a quelle *single side* (Figura 40).

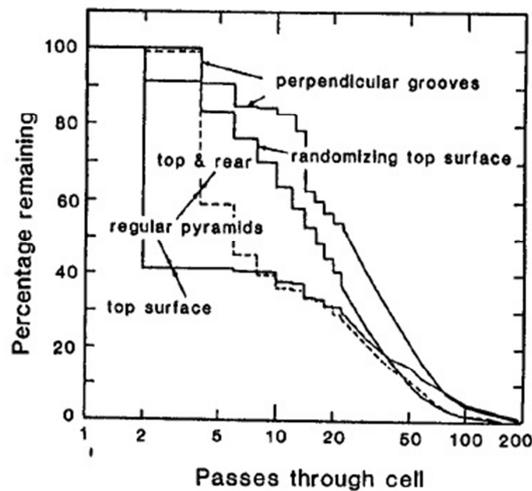


Figura 39: Grafico delle percentuali di passaggi effettuati dalla luce all'interno della cella, relative ad alcune tecniche di light trapping effettuate con double-side. Il numero di fotoni intrappolati è in funzione del numero di viaggi che effettua internamente alla cella [25].

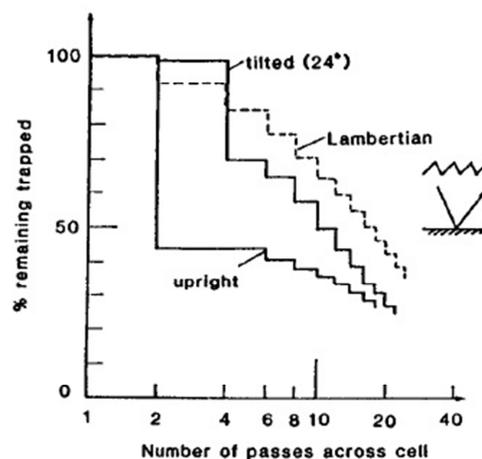


Figura 40: Grafico delle percentuali di passaggi effettuati dalla luce all'interno della cella, relative ad alcune tecniche di light trapping effettuate con single side [25].

La Figura 41 confronta diversi schemi di *light trapping*, dal punto di vista però di un parametro di grande rilevanza per l'efficienza delle celle, ossia la corrente di corto circuito. Si nota che il modello a *groove* perpendicolari, in base allo spessore della cella in μm , genera una corrente maggiore rispetto al modello

Lambertian. Poco distante da quest'ultimo, è la curva relativa alle piramidi poste su entrambe le facce della cella, mentre le *single-side pyramids* occupano un posto intermedio fra tutte le tecniche appena studiate, al di sopra dei wafer *polished*. Il *tiler's pattern* e le piramidi oblique, anche se non citate nel grafico, sono un ottimo approccio alle caratteristiche del caso *Lambertian*.

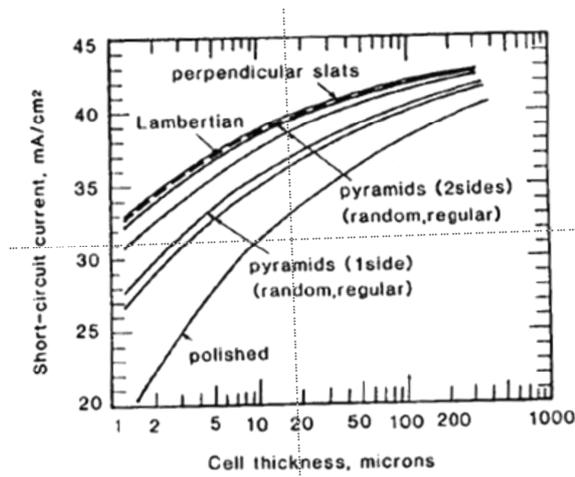


Figura 41: Densità di corrente di corto circuito in funzione dello spessore del wafer in silicio della cella solare, rispetto a diverse tecniche di light trapping [25].

Le *inverted pyramid* (celle PERL, Paragrafo 1.4) sono piramidi a base quadrata con la punta invertita, e grazie a questa particolare texture, offrono prestazioni leggermente migliori rispetto alle piramidi regolari, dal momento che vi è una forte possibilità di riuscire ad intrappolare nuovamente la luce che era sfuggita precedentemente dalla cella.

Nella Figura 42 vengono messe in evidenza le percentuali di intrappolamento della luce delle geometrie piramidali appena discusse, in funzione al numero di passaggi che i fotoni eseguono all'interno della cella.

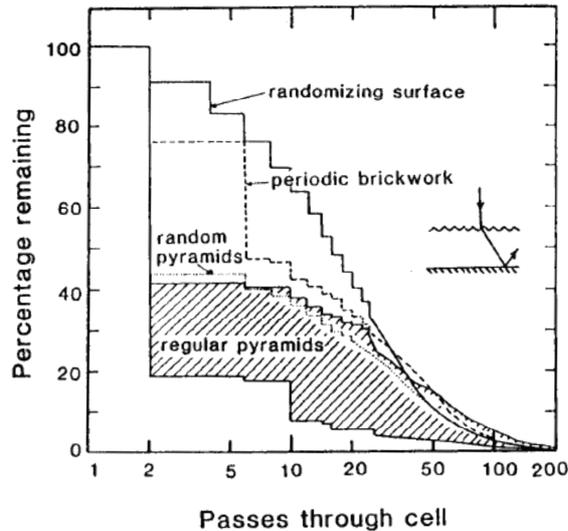


Figura 42: Percentuale di luce intrappolata in funzione al numero di passaggi che essa ha effettuato all'interno della cella. In particolare, il "periodic brickwork" indica il tiler's pattern. Prevale sicuramente su tutte le altre, in percentuale, la tecnica della superficie randomizzata [25].

2.4 LIGHT TRAPPING IN ENCAPSULATION

Legato al *light trapping* delle celle è il relativo *light trapping* delle celle incapsulate, o *light trapping in encapsulation*, tramite una lastra di vetro. Yablonovitch [36] comparò gli effetti prodotti da questa tecnica, utilizzando una superficie grezza: il risultato fu che la riflessione dei raggi dalla superficie esposta al sole, si ridusse dal 31% senza incapsulamento, all'11% con incapsulamento.

Successivamente, Wenham [37] ottenne risultati notevoli in termini di intrappolamento di fotoni, utilizzando l'incapsulamento di una cella a piramidi oblique. L'inclinazione fu raggiunta tagliando il wafer fuori dall'orientazione dell'asse.

Il *light trapping in encapsulation* fa affidamento alla riflessione totale interna grazie all'utilizzo della superficie anteriore, ma l'effetto di accumulo di polvere su di essa è un problema molto rilevante, che deve essere ridotto per consentire alla cella di lavorare a pieno regime [25].

Per quanto riguarda lo spessore dell'incapsulamento con vetro, il discorso è analogo a quello del wafer della cella solare (Paragrafo Introduzione): il costo del dispositivo aumenta proporzionalmente al volume. Si parla di circa 3.2mm attualmente, diminuendo fino a 2.8mm nel 2019 (Figura 43) [2].

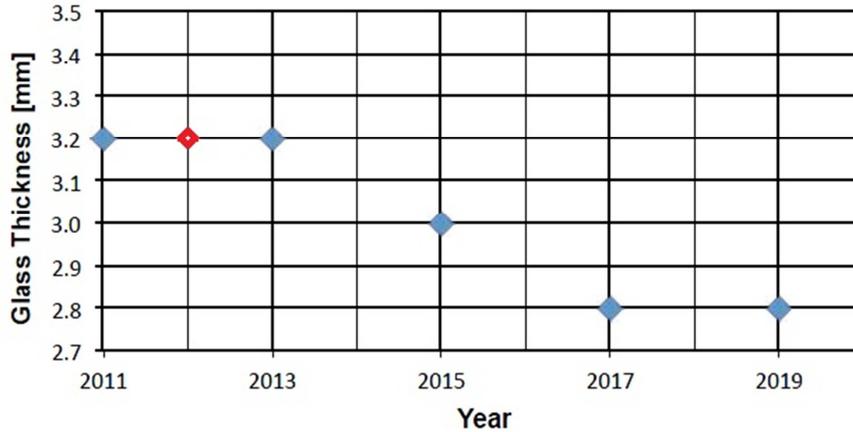


Figura 43: Grafico rappresentante il possibile andamento nella riduzione dello spessore del vetro per l'incapsulamento della cella solare [2].

2.5 ANALISI SPERIMENTALE E TEORICA DI UNA CELLA TESTURIZZATA IN SILICIO MONOCRISTALLINO

Una sperimentazione sulle tecniche di testurizzazione per la *light trapping* in celle c-Si è stata completata dall'Università della California, USA [38]. Di seguito vengono riportati i risultati conseguiti, utilizzando wafer di spessore di $170\mu\text{m}$, di cui $4\mu\text{m}$ di altezza della texture su entrambe le facce, e lati di $20\mu\text{m}$ per $20\mu\text{m}$. Prima di passare alla texture, il wafer è stato coperto da uno strato anti riflessione a base di nitrato, successivamente è stato drogato il substrato con POCl (ossicloruro di fosforo), e disposto su una lastra di alluminio per permettere la riflessione interna ai fotoni. Le testurizzazioni random delle facce sono indipendenti e formate da piramidi in silicio, localizzate casualmente sulla superficie. Ogni piramide è a base quadrata, con inclinazione di 55° rispetto alla normale orientazione cristallina ed, essendo sovrapposta l'una con l'altra, è parzialmente visibile dall'esterno, o totalmente oscurata da altre piramidi. La figura sottostante (Figura 44) è un esempio di randomizzazione piramidale.

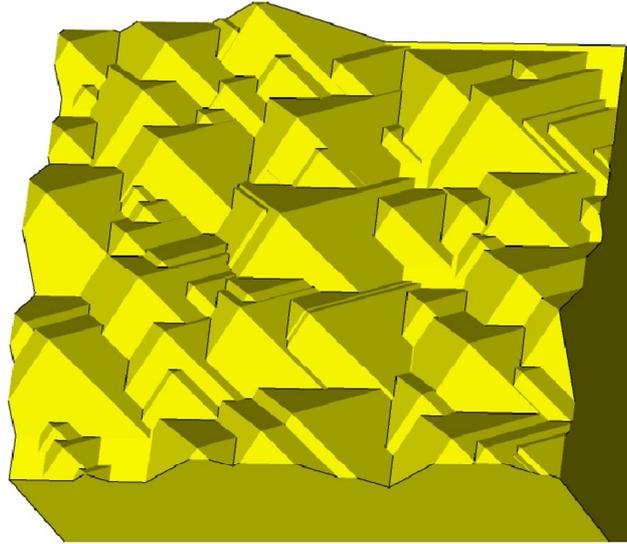


Figura 44: Rappresentazione di una texture in silicio formata da 100 piramidi di misure casuali, sovrapposte l'un l'altra, che ricoprono un'area di $400\mu\text{m}^2$ [38].

In un dominio di simulazione molto grande, le condizioni al contorno della riflessione introducono una piccola distorsione nella casualità della texture, il cui impatto è inversamente proporzionale al numero di piramidi coinvolte. Si è scoperto che usufruendo di oltre 50 piramidi, questa distorsione diviene trascurabile [38].

La Figura 45 illustra il comportamento teorico della luce con lunghezza d'onda di $0.3\mu\text{m}$, che appartiene alla radiazione ultravioletta solare. Parte del raggio luminoso viene assorbito all'interno del silicio, mediante generazione di coppie elettrone-lacuna. L'assorbimento della luce a questa lunghezza d'onda avviene su una distanza molto breve, meno di $1\mu\text{m}$. Quando il raggio colpisce la superficie della piramide per la prima volta, in questo caso al confine tra due facce della medesima piramide, l'intero raggio rimbalza. La seconda volta, invece, si divide in due raggi: uno viene assorbito, mentre l'altro rimbalza nuovamente, non contribuendo alla generazione di corrente. Nella realtà non si è utilizzato un wafer di spessore di soli $12\mu\text{m}$ come mostrato in figura, in quanto ha solo lo scopo illustrativo, perché è più facile delineare i dettagli dei percorsi compiuti dai fotoni.

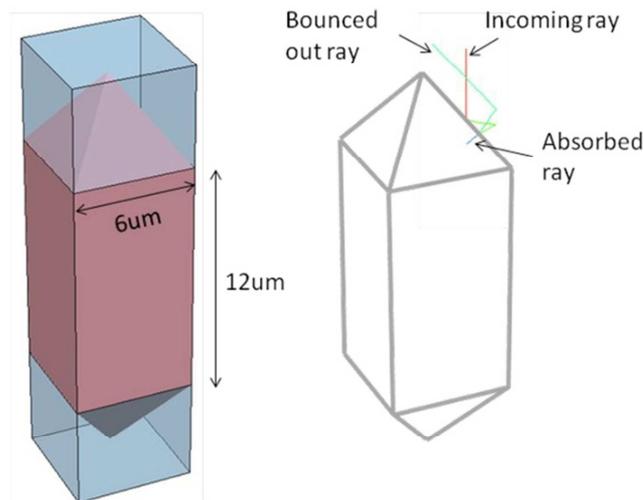


Figura 45: Texture a geometria piramidale regolare in silicio: lo schema rappresentante un singolo elemento e relative condizioni al contorno di riflessione. La luce ultravioletta, a lunghezza d'onda di $0.3\mu\text{m}$ è parzialmente assorbita dal silicio, l'altra parte viene riflessa dalla superficie [38].

Il percorso dei raggi, raffigurati più sopra, mostrano 4 riflessioni: due sulla superficie del silicio, e due su una parete invisibile di aria. In realtà la simulazione completa prevede un gran numero di piramidi adiacenti a quella di riferimento, perciò sono necessarie le ultime due riflessioni per rendere più vicino alla realtà la ricostruzione del percorso della luce. Il fatto che quest'ultima penetri nel wafer solo dopo una riflessione, significa che l'assorbimento avviene nella piramide posta a destra del dominio di riferimento. Dal momento che si dispone di piramidi regolari, raggi simili tra loro rimbalzano in modo equivalente sulla superficie delle strutture; di conseguenza è possibile introdurre nella simulazione pochi parametri, appartenenti ad una singola piramide.

La Figura 46 mostra l'interazione della piramide con un raggio di lunghezza d'onda pari a $0.6\mu\text{m}$, che è una parte visibile dello spettro solare. In questo caso però sin dalla prima incidenza, il raggio si divide in due, di cui solo una frazione viene assorbita dalla cella. All'interno del wafer, i fotoni ne percorrono tutto il volume trasversale, per decine di micron, sino a fuoriuscire dalla parte posteriore.

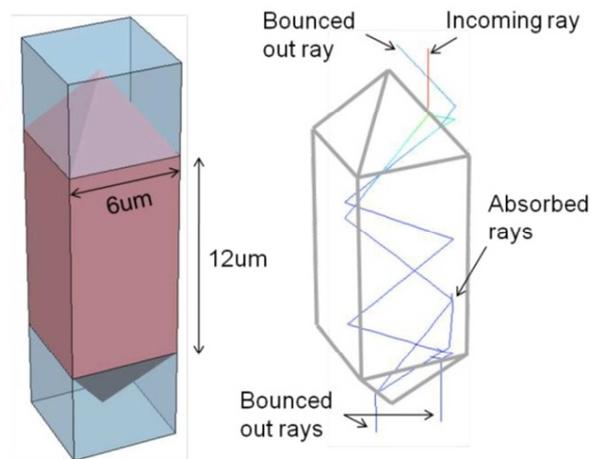


Figura 46: La luce visibile di lunghezza d'onda di $0.6\mu\text{m}$ è parzialmente assorbita dal silicio, parzialmente riflessa all'esterno e un'ultima parte trasmessa attraverso il wafer [38].

Sempre per la stessa struttura, viene illustrato il comportamento della luce di lunghezza d'onda di $0.9\mu\text{m}$ (Figura 47) che appartiene alla radiazione infrarossa solare. Questa lunghezza d'onda viaggia per centinaia di micron all'interno della cella, dividendosi numerose volte su entrambe le facce del wafer.

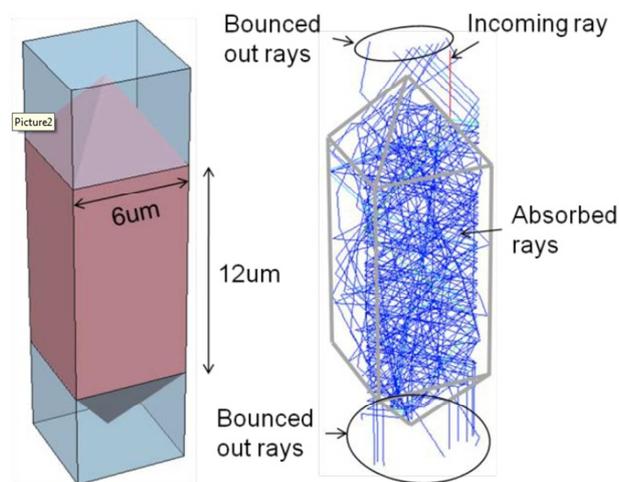


Figura 47: Luce infrarossa di lunghezza d'onda di $0.9\mu\text{m}$ parzialmente assorbita dal wafer, parzialmente riflessa da esso e trasmessa all'esterno della struttura. [38]

In definitiva, nella Figura 48, vengono confrontate le diverse risposte di riflettanza in percentuale, utilizzando piramidi regolari e random, in presenza di luce ultravioletta. Apparentemente, la texture casuale fornisce una riflettanza dal 15% al 17% in meno rispetto all'altra.

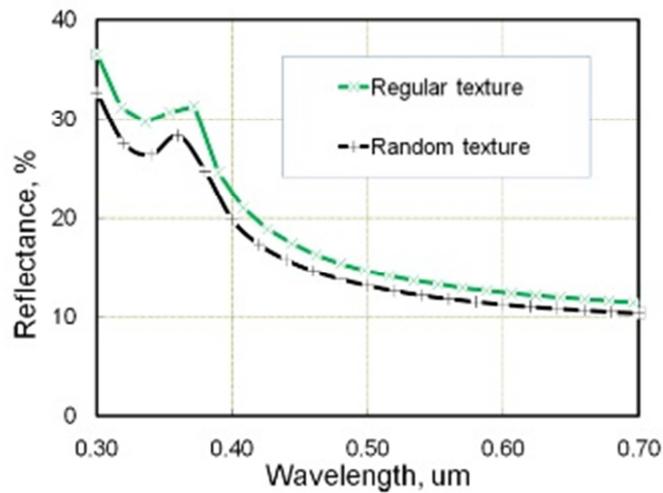


Figura 48: Simulazione della riflettanza di luce ultravioletta visibile per piramidi regolari e random[38].

L'ipotesi per la quale si ha una riflettanza inferiore per la texture casuale rispetto alla regolare è rappresentata in Figura 49: da questa prospettiva, si può notare che le piramidi regolari occupano solo il 50% dell'area totale, perciò, quando il raggio viene riflesso da una delle facce della piramide, ha minore probabilità di rimbalzare sulle altre adiacenti. Al contrario, la *random pyramids*, riempie quasi totalmente la stessa area, catturando con maggior facilità i fotoni che erano sfuggiti dalla struttura.

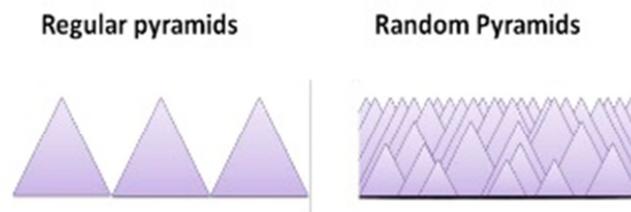


Figura 49: Illustrazione teorica della vista frontale delle texture regular e random pyramid [38].

La simulazione continua con un'altra variazione nella texture, prendendo in considerazione le due precedenti e aggiungendo una tecnica di *light trapping* a piramidi random, dotate però della medesima altezza di quelle *regular*. Il risultato è l'ottenimento di una curva percentuale di riflettanza inferiore alle precedenti (Figura 50).

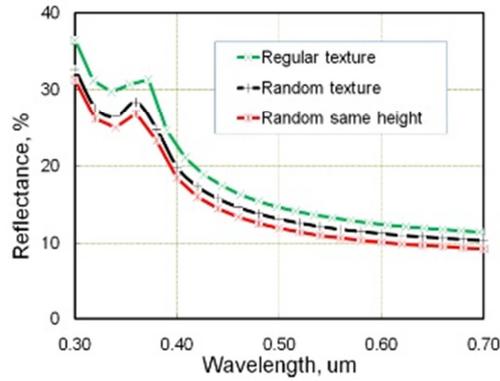


Figura 50: Simulazione che riporta una più scarsa riflettanza della texture a random pyramids con medesima altezza della regular pyramids [38].

Nella realtà, la struttura artificiale appena presentata, ha delle prestazioni intorno al 20% superiori alle *regular pyramids*, ed è leggermente migliore anche delle *random pyramids*. Ciò avviene a causa del dominio delle dimensioni dell'area presa in considerazione, $20\mu\text{m}$ per $20\mu\text{m}$, con circa 100 piramidi, in quanto la trama casuale presenta degli spazi vuoti, per cui non tutti i raggi ad angolo piccolo vengono considerati dalla struttura (Figura 51), e quindi persi. Contrariamente a questo, la texture artificiale di piramidi random con stessa altezza, copre la superficie in modo uniforme, spiegando il motivo delle sue prestazioni ottiche eccellenti.

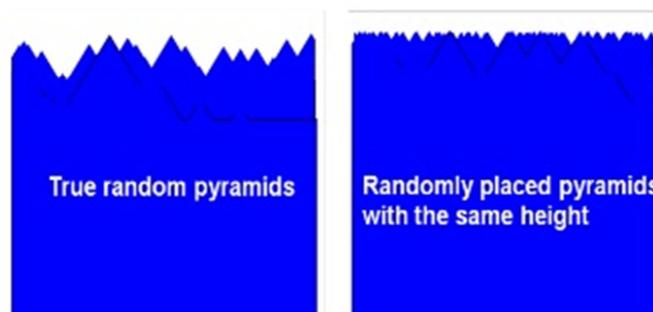


Figura 51: Confronto della texture random e artificiale, viste trasversalmente. Il dominio di simulazione ha dimensioni laterali di $20\mu\text{m}$ per $20\mu\text{m}$ [38].

Si quindi osservato che, simulando texture diverse senza particolari semplificazioni geometriche, le prestazioni migliori in termini di riflessione dell'interfaccia esterna, sono attribuibili alle *random pyramids*. Sono state poi analizzate le trame casuali e quelle create artificialmente: lo studio rivela che il vantaggio delle piramidi casuali risiede proprio nel posizionamento random di

queste ultime, mentre l'altezza uniforme della struttura artificiale aumenta le prestazioni. La metodologia del modello ottico utilizzato può essere ottimizzato per trovare la combinazione ideale di texture e passivazione del film per differenti progettazioni di celle [38].

2.6 PROCESSI DI FABBRICAZIONE DELLE TEXTURE 3-D: KOH E TMAH ETCHING

Per ottenere celle ad alte prestazioni, è necessario applicare delle texture alla superficie anteriore dei dispositivi, riducendo gli effetti di riflessione e migliorando il *light trapping*. Le diverse tecniche di texturing vengono costruite attraverso attacco in soluzioni alcaline o al plasma. Una di questa è composta da idrossido di potassio (KOH) e alcol isopropilico (IPA), utilizzate soprattutto per la formazione di texture a piramidi random. In un esperimento condotto in Korea [39], si è utilizzato un wafer in silicio di tipo p, con resistività di 1-2Ωcm. La superficie è stata cosparsa di una miscela di KOH e IPA e, per formare un emettitore di tipo n⁺, la diffusione di tipo p è stata eseguita in un ambiente con POCl₃. Il processo è seguito da un'ispezione al microscopio elettronico a trasmissione per controllare le incisioni formate nella sezione trasversale, di ioni Ar⁺, grazie ad una soluzione di HF:HNO₃:CH₃COOH per 5 secondi. Tale tecnica di formazione della texture (come molte altre simili ad essa) è molto valida, perché rappresenta un buon compromesso tra costo ed efficienza, ma a discapito della creazione di inquinamento ambientale [39].

Soluzioni alternative, per ottenere geometrie a tre dimensioni, sono quelle che contengono idrossido di ammonio tetrametile (TMAH, ossia (CH₃)₄NOH). In questo caso vi sono molti parametri che influiscono sul risultato (come la concentrazione, la durata, la temperatura); sotto opportune condizioni ottimizzate, l'utilizzo di TMAH ha portato ad un valore di riflettanza media ponderata del 13%, senza l'aggiunta di nessun tipo di ARC. Inoltre questa soluzione comporta un minore inquinamento ambientale e la procedura di passivazione è semplificata in presenza di tale sostanza. Nel caso che viene esposto di seguito, la concentrazione di TMAH varia dal 5% al 25%. Per ridurre le quantità e agevolare la tecnica mediante idrossido di ammonio tetrametile, e cercando comunque di creare piramidi uniformi, viene in aiuto un metodo che utilizza alcool isopropilico tensioattivo.

La sperimentazione, effettuata presso i *Laboratoire de Physique de la Matière*, avviene in un recipiente coperto, in modo tale da limitare l'evaporazione della soluzione. In contenitore viene poi posto dentro ad un impianto apposito per controllare la temperatura. La soluzione utilizza una concentrazione di TMAH del 25%, acqua deionizzata e IPA standard, mentre l'attacco avviene utilizzando

wafer in silicio dopato di tipo p; ma per prima cosa i campioni vengono immersi in una soluzione di acido fluoridrico (HF) per 10 secondi, aiutando ad eliminare lo strato di ossido naturale e successivamente sciacquati con acqua deionizzata. La riflettanza ponderata (WR) è calcolata normalizzando lo spettro di riflessione emisferico (350-1100nm) con lo spettro AM1.5D. Sul wafer di silicio poi viene stesa una lastra di ossido secco di 60nm (per 20 minuti a 1050°C in atmosfera formata da O₂). Lo strato ossidato viene attaccato con HF da un lato, spezzato, e ogni parte della superficie opposta alla precedente viene sottoposta a testurizzazione o con TMAH, o con KOH o lasciata senza texture. Successivamente, lo spessore di 1µm dei contatti di alluminio viene posto nella superficie attaccata in precedenza. La passivazione viene fatta sulla superficie testurizzata e pulita per 10 minuti con una miscela di H₂O₂:H₂SO₄, e per 10 secondi con una concentrazione di HF del 5%. Viene poi passivata ogni superficie con SiN_x:H, depositandolo sul substrato di silicio ad una frequenza di 440kHz tramite attacco chimico a vapore, potenziato al plasma (LF-PECVD). L'ellissometria spettroscopica ha permesso di determinare uno spessore del dispositivo di 75nm e un indice di rifrazione uguale a 2.

Le prime prove vengono fatte con TMAH diluito a diverse temperature, creando però bolle di idrogeno (3mm di ampiezza) sulla superficie del silicio, che provocano non uniformità e non riproducibilità delle piramidi. Le bolle si formano durante l'attacco chimico in soluzione basica (ad esempio KOH, TMAH, NaOH), causando il fenomeno della "pseudo-maschera", ossia sopprimendo la creazione delle piramidi. Il controllo del numero di bolle nonché della loro distribuzione e grandezza, è un punto fondamentale per la testurizzazione tridimensionale e per assicurare alla cella una superficie poco riflettente. Per evitare la formazione di bolle, vi sono due soluzioni: la prima consiste nell'applicazione di una forza di agitazione esterna (*driving stirring bar* e agitazione ultrasonica, US), la seconda utilizza un materiale tensioattivo (IPA) per incrementare la natura idrofila della superficie del silicio nei confronti delle bolle ad idrogeno. Alla fine di tutta la procedura, vengono realizzate piramidi di altezza di 5µm.

In base alla concentrazione di TMAH si ottiene una diversa riflettanza, che diminuisce incrementando la miscela dallo 0% al 2%. Dal 5% in poi, la riflettanza stessa aumenta a causa della formazione di piramidi più piccole, ma migliora l'uniformità. Essendo abbastanza costosa la soluzione di idrossido di ammonio tetrametile, con la concentrazione del 2% si assicura un buon rapporto tra la qualità e il costo. Per quanto riguarda l'utilizzo di IPA, una concentrazione del 9% garantisce un decremento di riflettanza e l'uniformità richiesta. Le onde US, utilizzate nel primo passo, permettono una replicabilità della texture superficiale dopo 20 minuti di utilizzo, mentre nel secondo passo non avviene l'agitazione esterna e si formano piramidi con un buon parametro di riflettanza. Per determinare la dipendenza dalla temperatura, vengono fatti esperimenti da 60°C fino a 90°C. La riflettanza diminuisce all'aumentare della temperatura.

In definitiva, la texturing attraverso TMAH può essere riassunta di seguito: il primo passo consiste nell'incrementare la ruvidità della superficie utilizzando onde ultrasuoni per 20 minuti, che le conferisce uniformità. Il secondo passo, senza agitazione esterna, crea la texture a piramide. Il processo viene ottimizzato dopo aver impiegato una soluzione che contiene il 2% di TMAH e l'8% di IPA, per 30 minuti a 80°C: il risultato è una riflettanza del 13%. Conclusioni simili possono essere raggiunte con miscele di 1% di KOH e 7% di IPA alla stessa temperatura, ma il vantaggio notevole dell'utilizzo di idrossido di ammonio tetrametile consiste nella riduzione notevole di inquinamento e nella facilità di passivazione della superficie. Il TMAH rimane comunque leggermente tossico [40].

3 Simulazioni e analisi di strutture light trapping per celle solari in silicio cristallino

3.1 RISORSE DI CALCOLO PER LA RISOLUZIONE DELLE EQUAZIONI DI MAXWELL

L'analisi delle tecniche di *light trapping* prosegue con alcune simulazioni delle principali strutture descritte nel capitolo precedente (Capitolo 2). Per poter proseguire, è dunque necessario descrivere le principali caratteristiche e limitazioni degli approcci numerici mediante i quali è possibile risolvere le *equazioni di Maxwell* del campo elettromagnetico.

Come ipotesi iniziale, si pone di essere in presenza di onde piane, che viaggiano in mezzi lineari e omogenei; tale ipotesi è sostenuta dal fatto che la radiazione solare ha una sorgente posta a distanza relativamente grande dal dominio in cui si studiano i fenomeni di propagazione. Inoltre ci si pone in totale assenza di cariche. Di seguito vengono descritti metodi di soluzione numerica delle *equazioni di Maxwell*, quali l'FDTD, il TMM ed il Ray Tracing.

3.1.1 FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)

Il FDTD [41] è un metodo di soluzione numerica che utilizza un modello elettrodinamico computazionale. In particolare, essendo un metodo che lavora nel dominio del tempo, le soluzioni possono ricoprire un'ampia gamma di frequenze, disponendo di un unico avvio di simulazione. L'FDTD opera discretizzando le *equazioni di Maxwell* nel tempo e nello spazio. Nel FDTD le grandezze elettromagnetiche sono perciò rappresentate nel dominio del tempo, e l'intervallo di discretizzazione temporale è limitato dal criterio di stabilità, che dipende dalle dimensioni delle celle della griglia numerica utilizzata. L'FDTD è in grado quindi di eseguire calcoli su strutture arbitrarie in termini di geometria e dimensione, risultando in tempi e risorse di calcolo (CPU, memoria) potenzialmente alti, anche in presenza di varianti del metodo che utilizzano algoritmi di calcolo parallelo; nella pratica, il suo impiego risulta possibile in presenza di strutture con dimensioni che possono essere comparate alla lunghezza d'onda della radiazione. L'FDTD trova applicazione non solo in ambito optoelettronico (celle solari, fotodiodi, laser, sensori di immagine, ecc.) ma anche in problemi di studio di guide d'onda ed antenne.

3.1.2 TRANSFER-MATRIX METHOD (TMM)

Il TMM è una tecnica generale utilizzata per risolvere problemi di meccanica statistica. L'idea di base è quella di scrivere la funzione di ripartizione come moltiplicazione di matrici chiamate *matrici di trasferimento*; è in grado di calcolare la riflessione, la trasmissione e l'assorbimento dei fotoni, che viaggiano in strati sottili e paralleli fra di loro, con interfacce planari. Rispetto all'FDTD, tale metodo è più veloce, e tiene conto anche delle riflessioni multiple che si possono generare all'interno del substrato delle celle solari, e fenomeni di interferenza, essendo un solutore rigoroso delle *equazioni di Maxwell*. È particolarmente utilizzato nei casi in cui si dispone di un *antireflection coating layer*, il cui spessore è tipicamente molto inferiore rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione.

3.1.3 RIGOROUS COUPLED-WAVE ANALYSIS (RCWA)

La RCWA [28] [42] è strumento rigoroso di soluzione numerica delle *equazioni di Maxwell*, che consente di ottenere un buon compromesso tra prestazioni (in termini di accuratezza) e richiesta di risorse di calcolo, soprattutto rispetto al metodo FDTD; risulta essere idoneo all'analisi delle prestazioni ottiche di texture in scala nanometrica. Nell'RCWA la luce è considerata come un'onda piana incidente l'interfaccia frontale della cella solare. Il dominio di calcolo è caratterizzato da condizioni al contorno di tipo periodico ai lati, di tipo assorbente lungo la direzione di propagazione della radiazione; è pertanto possibile esprimere i campi, elettrico e magnetico, nonché la permittività, in termini di espansioni modali di Fourier. Inserendo tale espansione nelle *equazioni di Maxwell*, viene generata una coppia di equazioni differenziali lineari di secondo ordine. Strutture arbitrariamente complesse, in termini di dipendenza spaziale della permittività, possono essere trattate considerando la suddivisione del dominio di calcolo in più strati all'interno dei quali, nelle implementazioni standard del metodo, la permittività ϵ può essere approssimata da una funzione a gradino (*staircase approximation*). Dal punto di vista del calcolo, l'approssimazione che si introduce è insita nell'ordine di troncamento finito delle espansioni modali lungo gli assi x e y (i troncamenti lungo tali direzioni sono chiamati N_x e N_y) (Figura 52). La complessità computazionale dell'analisi RCWA aumenta in modo proporzionale al cubo di $N_x \cdot N_y$ e linearmente al numero di strati adottati nell'approssimazione della permittività: quindi se si ha a disposizione una texture con altezza molto maggiore della lunghezza d'onda della radiazione, tale metodo non è più consigliato per la risoluzione del problema. Dal punto di vista matematico invece, il problema della risoluzione delle *equazioni di Maxwell* viene

ricondotto ad un calcolo agli autovalori all'interno di ogni strato, che risulta essere relativamente oneroso in termini computazionali.

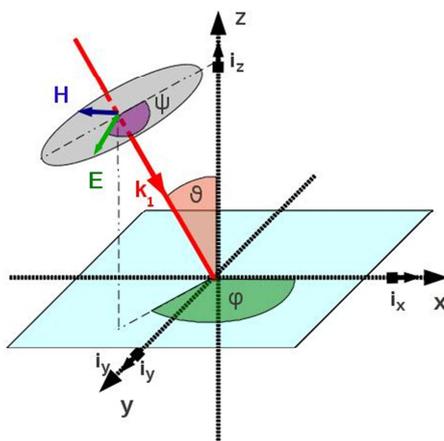


Figura 52: Rappresentazione schematica degli assi cartesiani del dominio spaziale di calcolo del simulatore RCWA con il vettore di propagazione dell'onda piana (k_1) individuato dagli angoli θ e φ .

3.1.4 RAYTRACER (RT)

L'algoritmo di tracciamento dei raggi luminosi *RT* consente di calcolare una soluzione non rigorosa delle *equazioni di Maxwell* in quanto in realtà esso risolve non direttamente le equazioni di partenza, ma le meglio note equazioni dell'iconale [43] che conducono a un sottoinsieme delle soluzioni delle *equazioni di Maxwell*. Il RT utilizza un metodo ricorsivo in cui si dispone di una sorgente di raggi luminosi (la cui traiettoria è la normale alla superficie equifase dell'onda piana), che proseguono poi all'interno della struttura; dopodiché il *raytracer* costruisce un albero binario che riassume la storia dei raggi, in termini di trasmissione e riflessione tra le interfacce, a seconda degli indici di rifrazione dei mezzi. Dal momento che l'intensità, la direzione e la polarizzazione sono le uniche informazioni associate ai raggi, il RT non è adatto a gestire fenomeni di propagazione quali interferenza e diffrazione. In generale il RT è un metodo relativamente molto veloce, basato sull'approssimazione dell'ottica geometrica: si applica solo se le dimensioni geometriche, che concorrono a definire le grandezze elettromagnetiche, sono molto maggiori rispetto alla lunghezza d'onda delle radiazioni incidenti la superficie della cella. Difatti non viene utilizzato per la modellazione della propagazione elettromagnetica in nano strutture, viceversa è molto conveniente il suo utilizzo, anche dal punto di vista del tempo di calcolo,

per le texture piramidali di celle in silicio cristallino, le quali tipicamente non hanno dimensioni geometriche tali da violare il principio dell'ottica geometrica. Se si è in presenza di un ARC sulle piramidi, il *raytracer* può essere utilizzato in combinazione con il TMM (Paragrafo 3.1.2). I parametri utilizzati dall'algoritmo vengono descritti di seguito. Il parametro principale è la densità spaziale dei raggi: data una finestra di generazione della sorgente di raggi, ampia quanto un elemento periodico della cella, si definisce densità spaziale ρ il rapporto tra il numero di raggi (n) e la larghezza di tale finestra (w). Maggiore è il valore di ρ , migliore sarà l'accuratezza del metodo, ma più lunghi saranno i tempi di elaborazione dei calcoli e la quantità di memoria richiesta. Un altro parametro è il *depth limit*, ovvero il numero massimo di *scattering* (rimbalzi sulle superfici) subiti dal raggio, prima di essere eliminato dalla simulazione. Tale valore deve essere deciso con cura, onde evitare che il raggio sparisca subito dalla simulazione o al contrario sia troppo alto, per cui il simulatore continua a considerare il raggio anche se oramai ha già perso la maggior parte dell'intensità iniziale. Infine, l'intensità minima μ_{min} del raggio, data dal rapporto tra le intensità in un dato nodo del dominio (I^*) e quella iniziale (I). Il *depth limit* e l'intensità minima insieme formano le condizioni di uscita (*breaking criteria*) del tracciamento dei raggi.

3.2 SIMULAZIONI DI TEXTURE APPLICATE A CELLE IN SILICIO MONO CRISTALLINO

Di seguito vengono descritte le simulazioni, di strutture di texture applicate alle celle solari in silicio cristallino e discussi i risultati in termini di riflettanza. Nel seguito, salvo diversamente specificato, si assumono le seguenti ipotesi: le interfacce considerate sono sempre tra aria e silicio (in particolare non si considera l'eventuale strato di etilene vinil acetato, EVA). Lo spessore del substrato è di $100\mu\text{m}$ (in accordo con il valore desunto dalle roadmap nei prossimi 15 anni (Figura 1)). Escludiamo la presenza di un back reflector e assumiamo θ_i (Figura 53) come angolo di incidenza della radiazione rispetto alla normale del piano del dispositivo.

Verranno simulate in particolare celle dotate di *anti-reflection coating*, sia singolo che doppio, celle con texture di tipo bidimensionale, V-groove (Paragrafo 2.3.2.1), e testurizzazioni con piramidi regolari, sia di tipo invertito che di tipo *upright* (Paragrafo 2.3.2.2). Infine i risultati in termini di riflettanza verranno confrontati con quelli della struttura di riferimento, che rappresenta lo strato di silicio cristallino di $100\mu\text{m}$ senza ARC e texture.

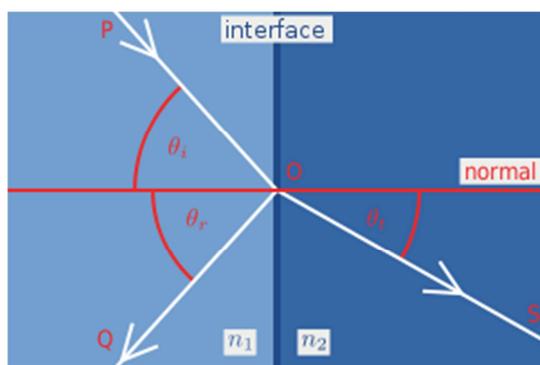


Figura 53: Rappresentazione degli angoli formati da un'onda quando questa subisce uno scattering su di una interfaccia con materiali di differente indice di rifrazione.

3.2.1 SUPERFICI PIANE SPECULARI

Nel seguito, ogni simulazione di superfici planare, senza e con ARC, è effettuata mediante RCWA (Paragrafo 3.1.3), in quanto è il metodo più conveniente per questo tipo di strutture: tramite la RCWA è possibile calcolare la riflettanza in tempi relativamente brevi.

Nella Figura 54 (curva blu tratteggiata) è rappresentata la riflettanza della cella planare senza ARC: come poteva essere ipotizzabile anche senza l'ausilio di simulazioni, la curva risulta possedere, per lunghezza d'onda compresa tra i 300nm e i 1000nm, valori relativamente alti, oltre lo 0.6, in quanto è molto difficile per il dispositivo poter intrappolare all'interno un gran numero di fotoni necessari alla creazione della coppia elettrone-lacuna. Inserendo invece dei *coating* che permettono di diminuire la riflessione, si osserva che le riflettanze diminuiscono enormemente, addirittura toccando valori intorno allo 0 per la lunghezza d'onda pari a 600nm. Per il *single-layer ARC* è stato utilizzato nitruro di silicio, mentre per il *double-layer ARC* il fluoruro di magnesio insieme a diossido di titanio, per via delle loro proprietà ottiche e del loro largo impiego commerciale: infatti l'indice di rifrazione dell' Si_3N_4 si avvicina molto al valore ottimale che minimizza la riflettanza alla lunghezza d'onda di 600nm (solitamente l'*anti-reflection coating* viene dimensionato in base a tale lunghezza d'onda). Per mezzo della (2.1) lo spessore calcolato di nitruro di silicio è di 75.65nm. Per quanto riguarda il DLARC, non ci si è serviti della (2.2), in quanto risulta essere un'equazione utile per trovare l'indice di rifrazione ideale per un singolo ARC, bensì di altre due formule di seguito riportate [44]:

$$\hat{n}_1 = \sqrt{\frac{\hat{n}_0 \hat{n}_2^2}{\hat{n}_3}} \quad (3.1)$$

$$\hat{n}_2 = \sqrt{\frac{\hat{n}_1^2 \hat{n}_3}{\hat{n}_0}} \quad (3.2)$$

che invece si riferiscono a due layer che si trovano, nel caso studiato, tra aria (\hat{n}_0) e silicio cristallino (\hat{n}_3). Di conseguenza si è simulato uno strato di MgF_2 di 109.31nm e uno di TiO_2 di 60.38nm. Nel DLARC si è tenuto conto anche del fatto che le prestazioni della cella potessero migliorare considerando valori di indici di rifrazione di ARC compresi tra quelli dell'aria e del substrato, in ordine crescente partendo dall'esterno e proseguendo all'interno. Nel grafico sottostante si nota che, come da previsioni, il doppio layer ha effettivamente un effetto benefico molto rilevante se confrontato alla cella priva di ARC, e valori costanti di riflessione attorno al minimo raggiungibile, in rapporto al SLARC. Per tutte e tre le curve simulate, proseguendo oltre i 900nm, si hanno picchi positivi e negativi, con massimi sopra allo 0.6 per il *single layer* e sopra lo 0.50 per il *double layer*. Ciò è dato dalle riflessioni multiple tra il piano anteriore e posteriore. In specifico, nell'intervallo spettrale compreso tra i 400nm e i 1000nm, la riflettanza assume valori relativamente bassi, ossia tra lo 0.06 e lo 0.40. Prendendo invece in considerazione tutte le lunghezze d'onda simulate, i valori della riflettanza non superano lo 0.72.

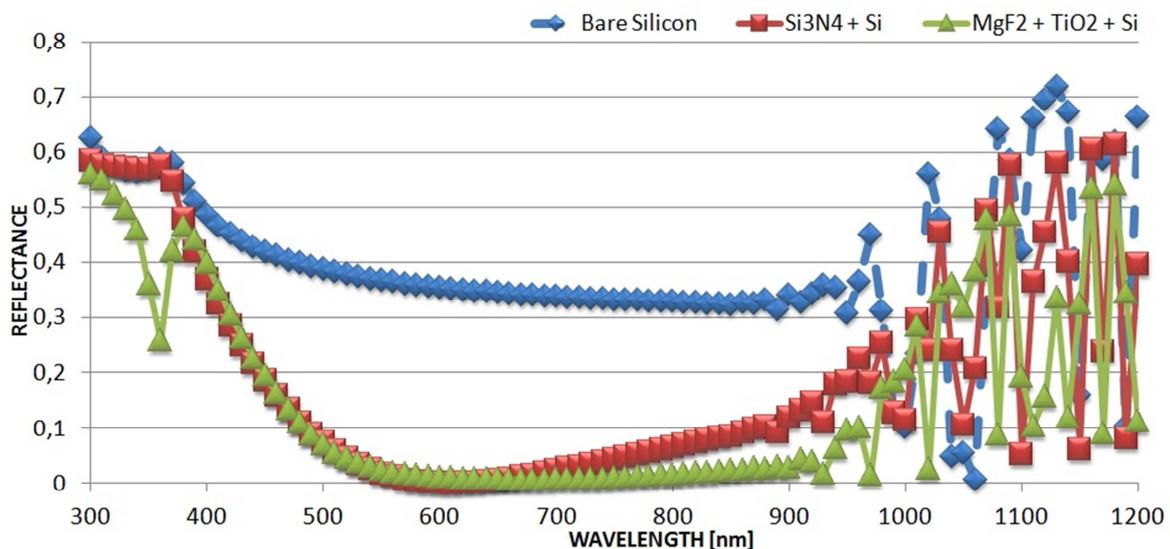


Figura 54: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a superfici planari differenti, con SLARC di spessore di 75.65nm, e DLARC di spessore di 109.31nm (MgF_2) e 60.38nm (TiO_2).

3.2.2 TEXTURE V-GROOVE

Le simulazioni di testurizzazione V-groove sono eseguite anch'esse tramite RCWA, essendo tale simulatore piuttosto efficiente in termini computazionali per geometrie 2-D. In presenza di tale texture però, non trattandosi di superfici planari, è opportuno considerare entrambe le polarizzazioni dei modi d'onda, sia trasversa elettrica (TE) che trasversa magnetica (TM), assumendo lo stesso valore di ampiezza del campo elettrico (magnetico). Nel caso TE, il campo elettrico ha la sola componente lungo y (Figura 52), nel caso TM è il campo magnetico ad avere una sola componente lungo y. In questo caso particolare, una volta note le riflettanze per entrambi i modi, possiamo calcolare quelle di un'onda con polarizzazione arbitraria ($E = (E_x, E_y, 0)$), tramite media aritmetica delle due riflettanze.

Gli angoli α_2 creati dalle superfici inclinate di ogni singola groove (Figura 55), sono stati scelti in base all'orientamento cristallografico del silicio e al piano di taglio. Inoltre, per poter confrontare i differenti casi, è necessario mantenere costante il volume della cella: di conseguenza, a seconda dell'ampiezza dell'angolo α_2 , lo spessore di ogni elemento è stato modificato, insieme all'altezza della groove.

Nella Figura 56 sono riportate le curve di riflettanza di V-groove senza ARC del modo TE, calcolate per diversi angoli α_2 (Figura 55): al diminuire dell'ampiezza dell'angolo α_2 , si devia sempre di più dalla struttura caratterizzata dalla superficie planare, di conseguenza la riflessione dell'onda all'interfaccia diminuisce, consentendo la generazione di una maggiore densità di corrente fotogenerata nella cella. Nel caso degli angoli $\alpha_2 = 109.6^\circ$ e $\alpha_2 = 129.6^\circ$, per alcune lunghezze d'onda (in un intervallo compreso tra i 530nm e i 900nm), la riflessione, anche se in modo lieve, supera quella del silicio senza texture, restando però sotto lo 0.40. Un caso particolare è quello dato da $\alpha_2 = 70.6^\circ$, in quanto la curva supera quella di $\alpha_2 = 90.0^\circ$, rimanendo però piuttosto vicina ad essa, con riflettanza di circa 0.20. La medesima considerazione vale anche per il modo TM (Figura 57), che differisce dal primo solo per valori di riflettanza minori rispetto al modo TE. In questo caso infatti, tutte le curve, non considerando lunghezze d'onda superiori ai 900nm, esibiscono valori inferiori allo 0.2: in particolare, sotto i 109.6° di α_2 , la riflessione ha un massimo di 0.18 e un minimo prossimo allo 0, della curva con *groove* di 60.0° . Una *groove* molto appuntita permette una rifrazione maggiore nel substrato. Essendo ancora in presenza di strutture 2-D, la riflettanza della cella, oltre una lunghezza d'onda di 900nm è ancora sensibilmente dipendente dalle riflessioni interne al silicio. Questo fenomeno però è meno presente rispetto ad una cella planare, in quanto la struttura a *groove* favorisce un percorso più lungo dei fotoni nel substrato, di conseguenza la probabilità di assorbimento di questi aumenta, e una quantità inferiore di fotoni subisce riflessioni multiple interne, con il conseguente effetto di picchi molto meno accentuati.

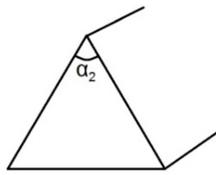


Figura 55: Rappresentazione dell'angolo di apertura preso in considerazione nelle simulazioni delle texture V-groove e di piramidi. α_2 rappresenta l'angolo tra due piani (facce) inclinati. La base della V-groove è mantenuta a $10\mu\text{m}$ mentre, al variare di α_2 varia l'altezza della groove.

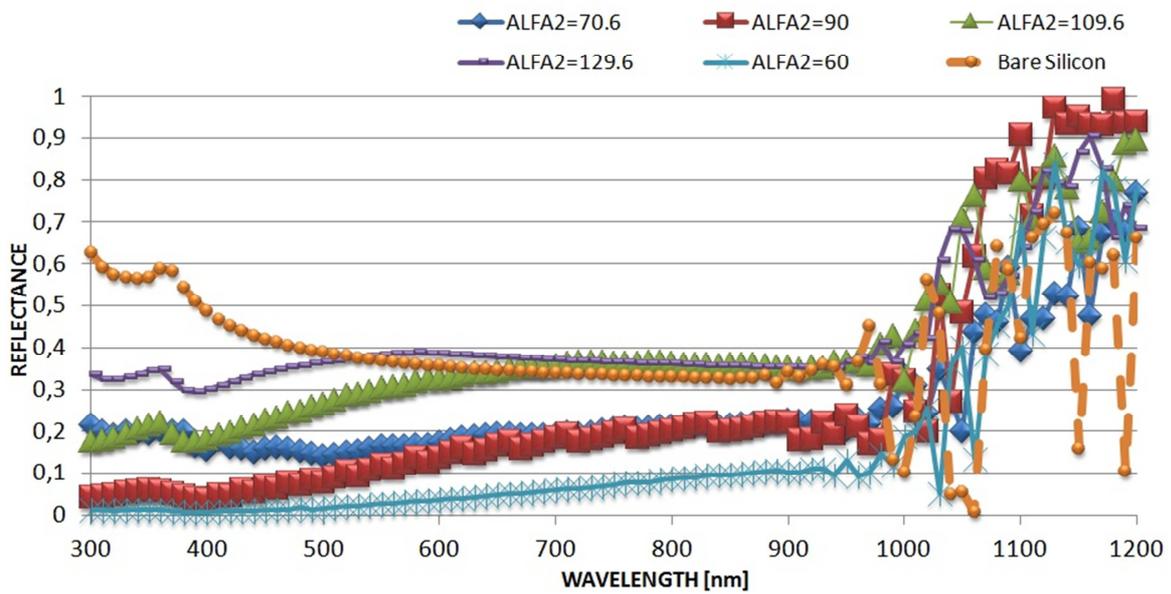


Figura 56: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture V-groove senza ARC (modo TE), con spessore $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$.

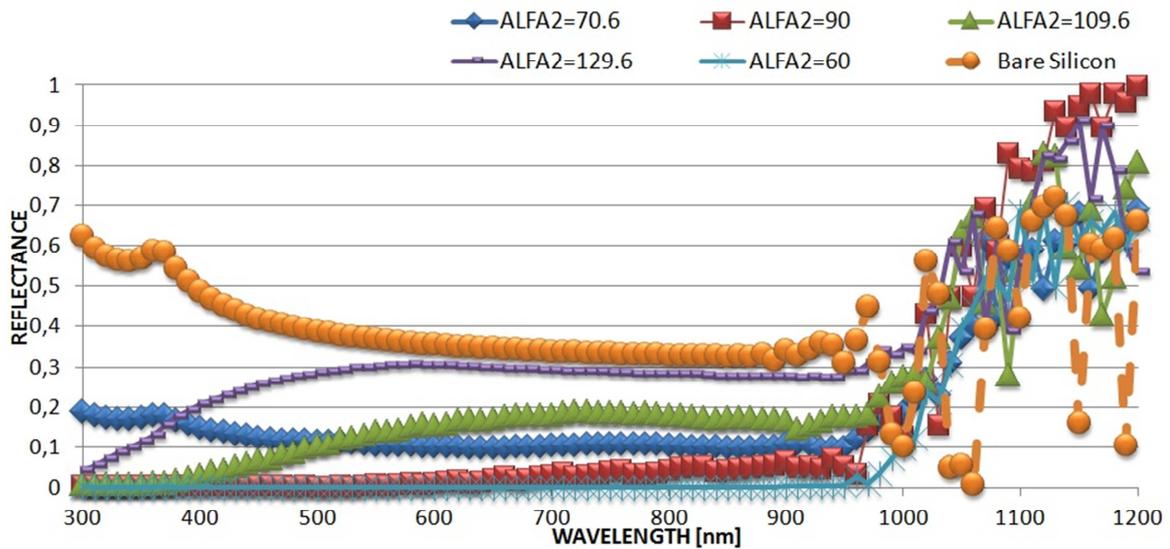


Figura 57: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture V-groove senza ARC (modo TM), con spessore 100 μ m e base 10 μ m.

Nelle texture V-groove si è successivamente considerato un ARC a singolo strato. La scelta del materiale del SLARC è avvenuta con modalità analoga alle superfici piane, perciò il nitruro di silicio è stato utilizzato anche in queste simulazioni. Per non appesantire i calcoli del simulatore, si è scelta solamente la V-groove del caso particolare visto in precedenza, con α_2 pari a 70.6°. Sia per il modo TE (Figura 58) che per il modo TM (Figura 59), i valori della riflessione in presenza di ARC differiscono ampiamente dal caso senza ricoprimento. Il minimo raggiunto dal modo trasverso elettrico e quello del modo trasverso magnetico sono confrontabili e prossimi allo 0, nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra i 300nm e i 900nm. L'*anti-reflection coating* in Si_3N_4 apporta un significativo vantaggio rispetto ad un'architettura priva di ARC: la riflessione è quasi del tutto trascurabile per lunghezze d'onda fino a 800nm, dopodiché la luce non assorbita viene parzialmente riflessa dall'interfaccia. Oltre i 1100nm la riflettanza di celle V-groove con ARC è superiore a quella senza ARC: si osservano picchi fino a 0.93 (TE) con nitruro di silicio, mentre di 0.76 per la *groove* priva di ricoprimento (TE).

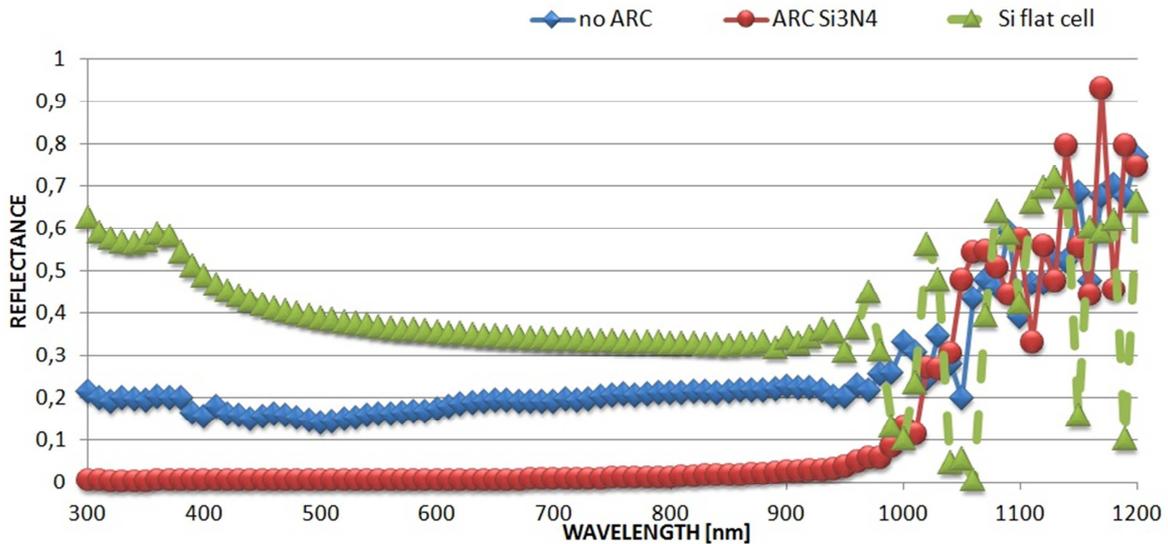


Figura 58: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture V-groove, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC, con spessore del wafer di $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$ (modo TE).

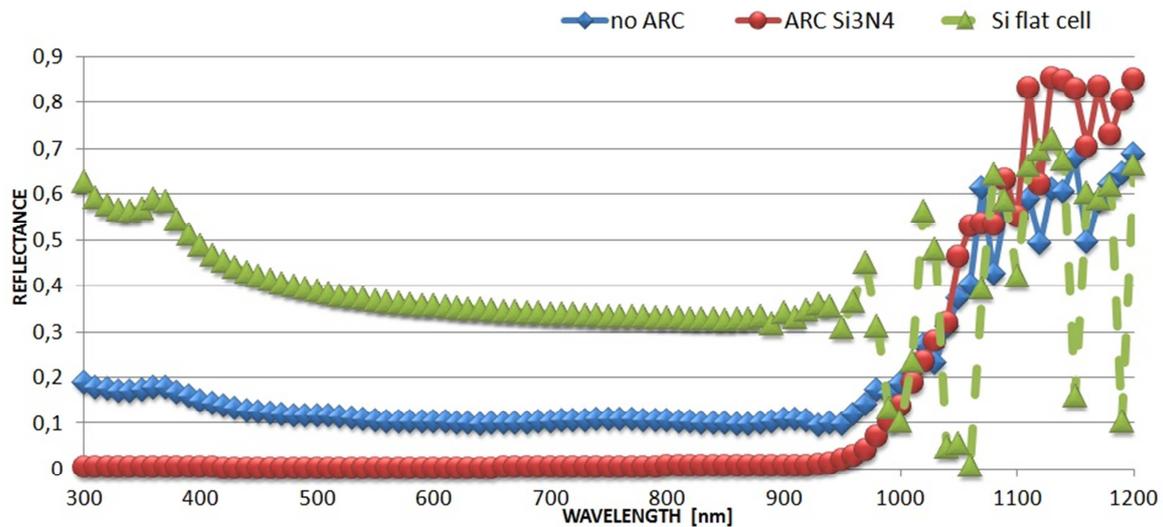


Figura 59: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture V-groove, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC, con spessore $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$ (modo TM).

3.2.3 TEXTURE A PIRAMIDI

La simulazione di testurizzazione a piramidi tramite RCWA necessita di processori potenti, perciò sono realizzate tramite RT (Paragrafo 3.1.4), che consente di elaborare strutture complesse, come possono essere quelle in 3-D delle piramidi. Come per le V-groove, anche per le simulazioni delle texture

piramidali si sono scelti angoli diversi α_2 , sempre con θ_i pari a 0° , in modo tale da investigare i differenti comportamenti della struttura in base alla geometria. Ogni piramide utilizzata è a base quadrata ($10\mu\text{m}$ per ogni lato), di ugual volume, e perciò di altezza differente, a seconda di α_2 ; le testurizzazioni utilizzate sono quelle a piramidi invertite e le piramidi *upright*. Il *raytracer* automaticamente scompone l'onda ($E = (E_x, E_y, 0)$) nei modi TE e TM e applica le leggi che regolano lo scattering alle interfacce separatamente. Le prime ad essere esaminate sono le *inverted pyramid* di Figura 60: osserviamo che le strutture a piramidi con $\alpha_2 = 129.6^\circ$ hanno una riflettanza quasi del tutto coincidente a quella della superficie piana, tranne che per lunghezze d'onda al di sopra dei 900nm ; analogamente avviene anche per la curva riferita all'angolo $\alpha_2 = 109.6^\circ$. Ciò significa che a parità di prestazioni, sicuramente dal punto di vista commerciale sarà più conveniente evitare strutture 3-D ad angolazione ampia, che non permettono di sfruttare al meglio le potenzialità della texture piramidale. Dai 300nm ai 1000nm circa di lunghezza d'onda, le piramidi possiedono una capacità di riflessione molto minore rispetto ai casi precedenti, al di sotto dello 0.40 ; in particolare si parte da un massimo di 0.39 per α_2 di 90.0° , fino ad un minimo di 0.057 della piramide con α_2 di 60.0° . Questi risultati sono considerevoli, nonostante non ci sia la presenza di nessun tipo di ARC che potrebbe assicurare una riflessione relativamente più bassa. Fondamentale è il comportamento della luce per diverse lunghezze d'onda: la curva della riflettanza in questo caso assume valori di picco molto meno differenti l'uno dall'altro, grazie alla geometria 3-D che consente una rifrazione nel substrato con diversi angoli di inclinazione, in modo tale da allungare il percorso dei fotoni.

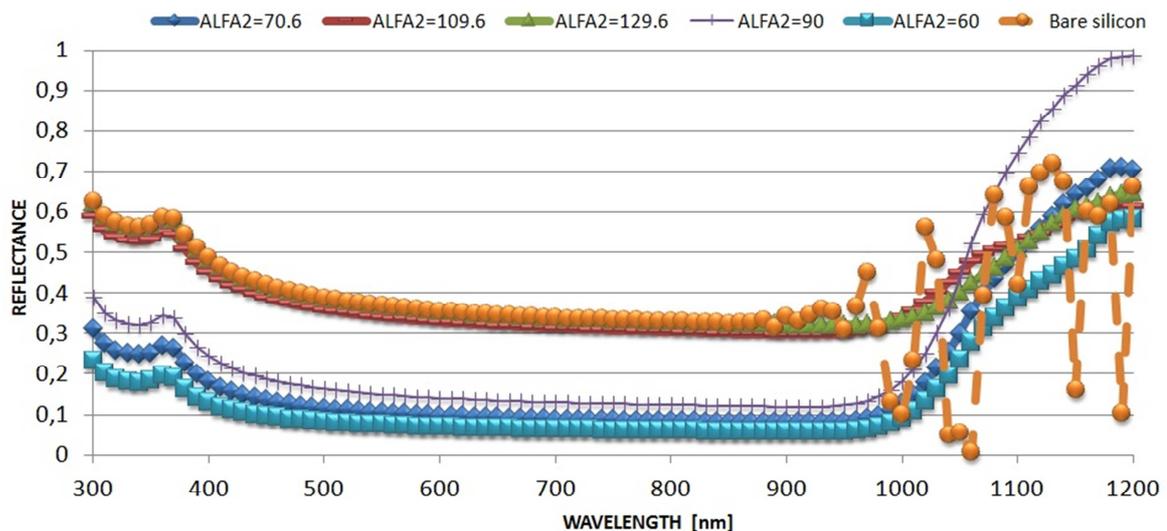


Figura 60: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture inverted pyramid senza ARC, con base di $10\mu\text{m}$ e altezza delle piramidi differenti, a seconda dell'angolo α_2 .

Le *upright pyramid* presentano una dipendenza dall'incidenza dell'onda luminosa, in termini di riflettanza, in maniera del tutto simile alle piramidi invertite (Figura 61) con riflessione maggiore rispetto al primo caso. Per α_2 di 129.6° la situazione non cambia sostanzialmente, in quanto la curva coincide ancora con quella della superficie planare. In modo differente invece, con la piramide di 109.6° di angolo, si ottengono valori di riflessione più piccoli di quella invertita, fino a toccare lo 0.26 tra gli 800nm e i 950nm di lunghezza d'onda. Per α_2 di 60.0° , la struttura risulta essere la più efficace, per ogni lunghezza d'onda; difatti si osservano valori di 0.24 di riflettanza a 300nm, diminuendo sino ad un minimo di 0.052 attorno ai 900nm di lunghezza d'onda. Le architetture con angoli di 70.6° e 90.0° hanno prestazioni relativamente simili, tranne che per valori molto alti di riflettanza raggiunti dall'ultima struttura oltre una lunghezza d'onda di 1050nm, con picco di 0.98 di riflessione.

Entrambe le strutture piramidali presentano una pronunciata dipendenza di riflettanza da α_2 , ossia all'aumentare del valore di questo angolo, accresce anche la riflessione dei fotoni verso l'esterno, in quanto diminuisce la pendenza, rendendo la texture pianeggiante rispetto a piramidi con α_2 piccoli.

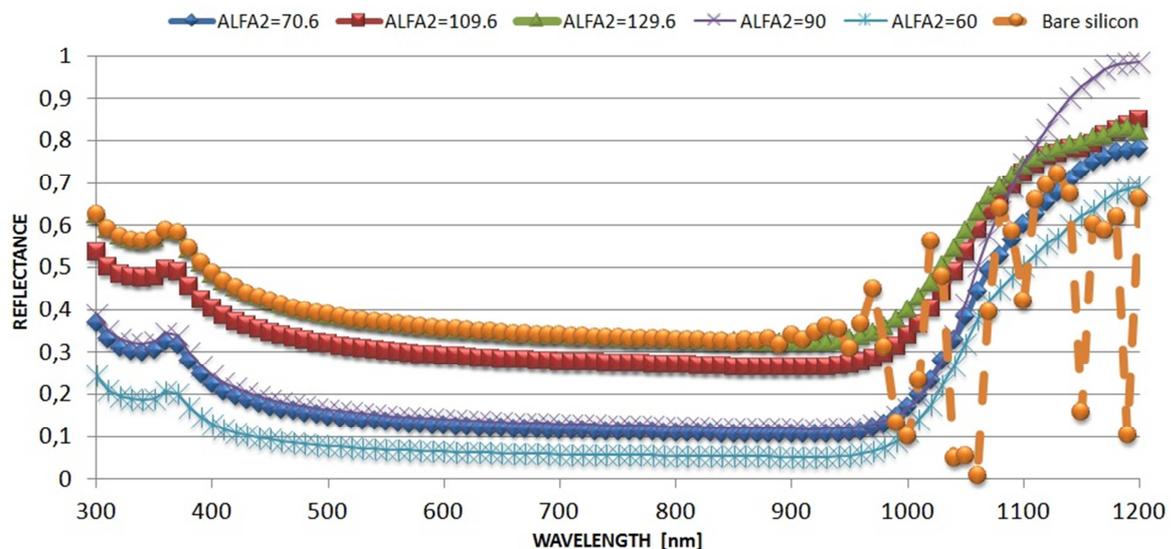


Figura 61: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture upright pyramid senza ARC, con base di $10\mu\text{m}$ e altezza delle piramidi differenti, a seconda dell'angolo α_2 .

Mettendo a confronto le piramidi invertite e le *upright* con angolo $\alpha_2 = 70.6^\circ$ (Figura 62) è evidente la sostanziale differenza di valori di riflettanza, a favore delle prime; la riflessione minima per le *inverted pyramid* tra i 910nm e 930nm è pari a 0.080, e di 0.104 per le *upright pyramid* tra le stesse lunghezze d'onda luminose. Questo perché, come riportato nel (Paragrafo 2.3.2.2), le piramidi a

struttura invertita consentono di collezionare un numero maggiore di fotoni, anche dopo che questi vengono riflessi la prima volta sulla loro superficie, dal momento che la direzione della riflessione è verso il basso, perciò accresce la probabilità di intrappolamento. Le piramidi sono inoltre molto sensibili all'integrazione di un ARC, che in questo caso coincide con quello utilizzato nelle texture a *V-groove*, di nitruro di silicio, di spessore pari a 75.65nm. In particolare, i benefici si sentono sino a circa 1000nm di lunghezza d'onda, dove per ambedue le texture, in particolare nell'intervallo tra 590nm e 610nm, i valori di riflettanza raggiungono lo 0; oltre i 1000nm invece, per quanto riguarda le *inverted pyramid* e le *upright pyramid* con ARC, le curve superano, anche se di poco, quella della stessa struttura senza *coating*. Questo fatto è spiegabile perché l'ARC tende a diminuire la riflessione dei fotoni, come già osservato. In ogni caso, una texture 3-D riduce notevolmente la riflessione, sia che si parli di ARC sia che si parli di texture senza ARC, rispetto alla superficie planare del *bare silicon*.

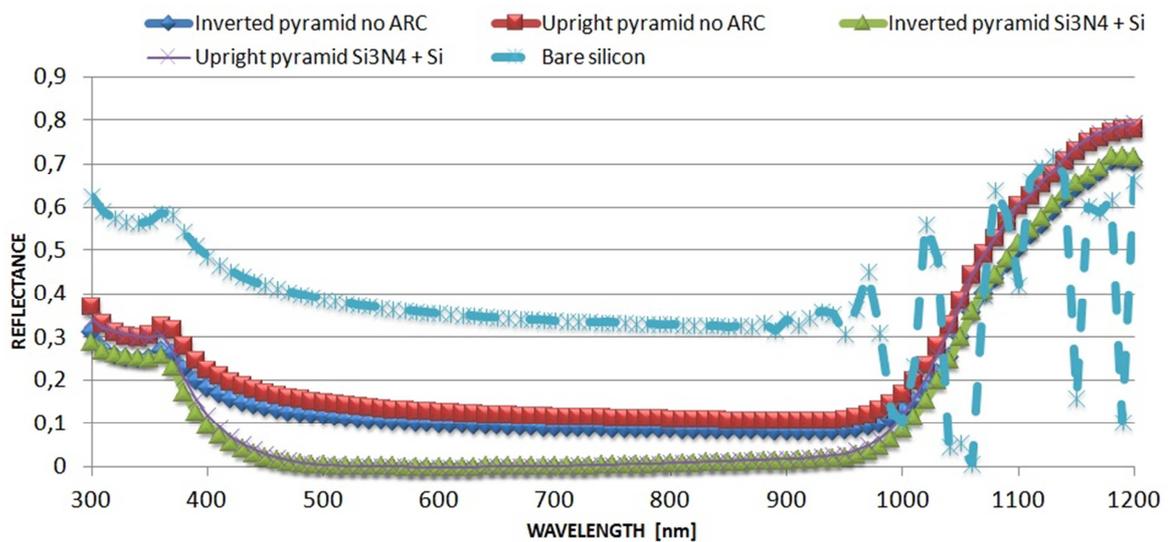


Figura 62: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture *inverted* e *upright pyramid*, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC.

Le curve di riflettanza calcolate con il RT non presentano i picchi alle alte lunghezze d'onda, come invece è stato osservato nelle simulazioni delle texture *V-groove*; questo perché il RT non è in grado di tenere conto delle diverse interferenze che si possono presentare, che sono difatti le principali responsabili delle oscillazioni alle alte lunghezze d'onda.

3.2.4 CONFRONTO DELLE CURVE DI REFLECTANCE

Per rendere esauriente l'analisi dell'utilizzo di diverse texture, di seguito (Figura 63 e Figura 64) vengono riportati i grafici di tutte le simulazioni effettuate, con angolo $\alpha_2 = 70.6^\circ$, senza ARC e con ARC. La linea blu tratteggiata rappresenta per entrambi i grafici, la cella planare senza impiego di ARC, e di conseguenza la riflessione, tranne quando interviene lo scattering ad alte lunghezze d'onda luminose, possiede valori maggiori rispetto a qualsiasi altra struttura. Le piramidi invertite (Figura 63), come previsto, esibiscono le maggior prestazioni sulle restanti texture, soprattutto dai 430nm di lunghezza d'onda, rimanendo a valori circa costanti sotto lo 0.10 di *reflectance*. Solo le *V-groove* risultano competitive fino ai 500nm circa, con riflettanza al di sotto dello 0.20, di minimo a 0.127 a 500nm. In realtà questo è l'unico risultato non conforme con quanto ipotizzato, dal momento che le texture 3-D si consideravano essere strutture migliori rispetto alle 2-D, per qualsiasi lunghezza d'onda (Paragrafo 2.3.2.2).

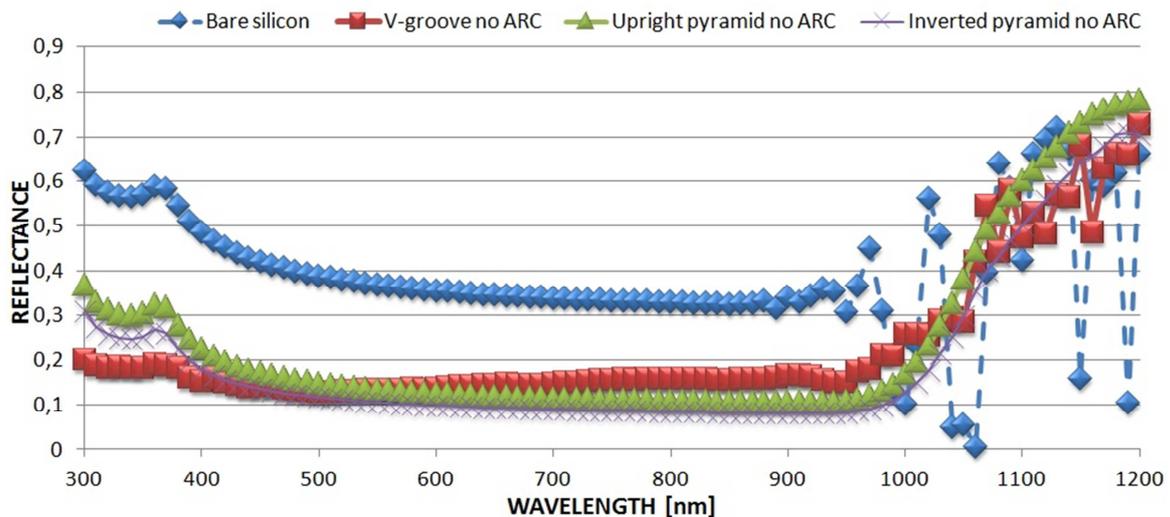


Figura 63: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a bare silicon e a texture differenti di tipo periodico (periodo $10\mu\text{m}$), con angolo α_2 pari a 70.6° , senza ARC, spessore substrato $100\mu\text{m}$.

Confrontando le strutture in esame con ARC di nitruro di silicio di spessore pari a 75.65nm (Figura 64) a parità di angolo di apertura α_2 , le curve presentano valori significativamente inferiori di riflettanza rispetto a quelli delle stesse texture analizzate senza ARC. Le *V-groove* esibiscono valori di riflettanza prossimi allo 0 (0.0026 a 500nm), fino a 930nm di lunghezza d'onda.

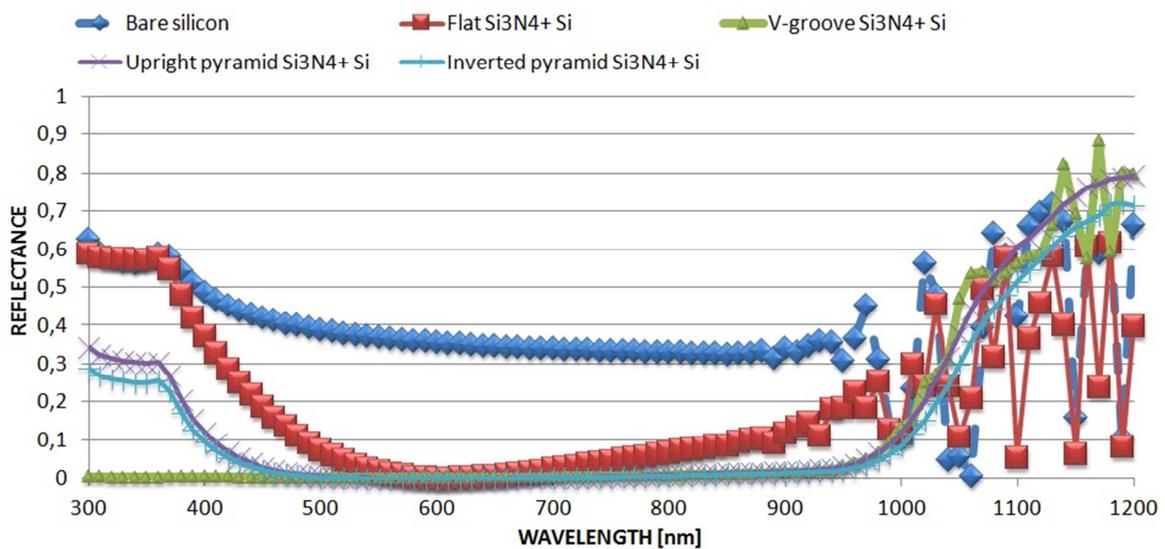


Figura 64: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a bare silicon e a texture differenti, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC.

3.2.5 CONFRONTO DEI VALORI DI DENSITA' DI CORRENTE FOTOGENERATA

Il calcolo della densità di corrente fotogenerata è effettuato utilizzando la formula (1.8) utilizzando lo spettro AM1.5G ($1000\text{W}/\text{m}^2$). In (Tabella 1) è riportato il valore della densità di corrente per le diverse strutture studiate, con e senza ARC. Tenendo conto delle considerazioni inerenti la riflettanza, il valore minimo di J_{ph} è quello relativo alla cella in silicio cristallino con superficie planare, di circa $24.99\text{mA}/\text{cm}^2$, valore ragionevole in quanto non si è aggiunto nessun tipo di *anti-reflection coating*. Per le strutture prive di ARC riferite alle texture *upright pyramid* e *V-groove* vi è una significativa differenza di densità di corrente, pari a $1.92\text{mA}/\text{cm}^2$, ma se si esaminano nel dettaglio le texture con nitrato di silicio, la J_{ph} per le *V-groove* è di $40.46\text{mA}/\text{cm}^2$, mentre per le piramidi regolari è di $40.82\text{mA}/\text{cm}^2$, presentando una differenza di appena $0.36\text{mA}/\text{cm}^2$. La *inverted pyramid* invece rimane comunque la struttura che possiede valori di densità di corrente maggiori rispetto a qualsiasi altra texture analizzata, consentendo di raggiungere una J_{ph} di $37.86\text{mA}/\text{cm}^2$ senza ARC, e di ben $41.18\text{mA}/\text{cm}^2$ in presenza di rivestimento. Si tenga presente che per il silicio, il valore massimo teorico di densità di corrente foto generata sotto le condizioni di irradiazione ipotizzate è circa $46\text{mA}/\text{cm}^2$, pertanto anche con substrati dello spessore considerato le prestazioni in termini di assorbimento della cella sono potenzialmente prossime a quelle massime.

Tipo di Texture ($\alpha_2 = 70.6^\circ$)	J _{ph} [mA/cm ²]
Bare silicon	24.99
V-groove no ARC	34.60
V-groove Si ₃ N ₄ ARC	40.46
Inverted pyramid no ARC	37.86
Inverted pyramid Si ₃ N ₄ ARC	41.18
Upright pyramid no ARC	36.53
Upright pyramid Si ₃ N ₄ ARC	40.83

Tabella 1: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture simulate differenti senza ARC e in presenza di ARC, con spessore del wafer di silicio di 100 μ m, base 10 μ m.

In particolare, solo per le *V-groove* senza ARC (Tabella 2), non tutti i valori delle densità di corrente rispettano un andamento monotono rispetto agli angoli α_2 , quindi rispetto all'inclinazione dei lati delle *V-groove*, in quanto per 70.6° si ha un valore di gran lunga inferiore rispetto a quello calcolato per angoli $\alpha_2 = 90.0^\circ$. Ciò è in accordo con il fatto che la riflettanza della struttura caratterizzata da $\alpha_2 = 70.6^\circ$ è maggiore di quella della groove con $\alpha_2 = 90^\circ$. Si raggiunge invece un minimo di 28.00mA/cm² per $\alpha_2 = 129.6^\circ$.

V-groove no ARC	
α_2 [gradi]	J _{ph} [mA/cm ²]
60.0	39.48
70.6	34.60
90.0	37.25
109.6	31.16
129.6	28.00

Tabella 2: Densità di corrente foto generata (J_{ph}) relativa a texture V-groove senza ARC, con spessore del wafer di silicio di 100 μ m, base della groove di 10 μ m.

I valori massimi di J_{ph} delle piramidi, sia invertite che regolari (Tabella 3 e Tabella 4) prive di ARC con α_2 pari a 60.0° sono inferiori rispetto alla densità di corrente della groove a parità di angolo. Inoltre, per α_2 pari a 109.6° e 129.6° , i valori delle J_{ph} rimangono inferiori ai 30mA/cm², perciò strutture con tale ampiezza di α_2 , come si era già osservato per i valori di riflettanza (Paragrafo 3.2.3), offrono prestazioni inferiori rispetto a quelle con α_2 più piccolo.

Inverted pyramid no ARC	
α_2 in gradi	Jph [mA/cm ²]
60.0	38.04
70.6	37.86
90.0	35.71
109.6	27.86
129.6	27.53

Tabella 3: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture inverted pyramid senza ARC, con spessore del wafer di silicio di 100 μ m, base della piramide di 10 μ m.

Upright pyramid no ARC	
α_2	Jph [mA/cm ²]
60.0	38.83
70.6	36.52
90.0	35.81
109.6	29.25
129.6	26.75

Tabella 4: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture upright pyramid senza ARC, con spessore del wafer di silicio di 100 μ m, base della piramide di 10 μ m.

Conclusioni

In questo lavoro sono state discusse le varie tecniche di *light trapping* per celle in silicio monocristallino, applicate sia alla superficie anteriore esterna, sia alla superficie posteriore interna. Correntemente le celle in silicio cristallino sono maggiormente impiegate nell'industria, anche se il rapporto costo/energia prodotta è relativamente alto, a causa dell'elevata purezza richiesta per i materiali utilizzati e dei processi di fabbricazione. Da una analisi delle roadmap relative al silicio cristallino emerge che, al fine di ridurre i costi dei materiali impiegati, entro i prossimi dieci anni sarà fondamentale la diminuzione dello spessore del substrato della cella, aprendo una questione di forte interesse relativa alle prestazioni di assorbimento della radiazione, che sono fortemente legate al volume del materiale utilizzato.

Partendo da uno studio dettagliato degli attuali schemi di intrappolamento della radiazione per celle monocristalline, in questo lavoro sono stati analizzati gli impatti dei differenti schemi convenzionali di testurizzazione e di abbattimento della riflessione esterna in termini di prestazione di assorbimento della radiazione in celle con spessore di substrato prossimo a quello previsto dalla roadmap nel 2020. Non sono state considerate le perdite ottiche dovute all'effetto ombreggiatura dei contatti frontali della cella e le diverse soluzioni sono state confrontate in termini di riflettanza e densità di corrente fotogenerata, ovvero escludendo qualunque meccanismo di perdita elettrico di una cella reale.

Da un'analisi bibliografica, si è arrivati alla conclusione che i dispositivi fotovoltaici che offrono maggiori prestazioni sono quelli in cui è presente il rivestimento anti riflessione (*anti-reflection coating*, ARC) che conferisce alla cella una probabilità maggiore di assorbimento di fotoni nel substrato di silicio, grazie ad una minore riflessione, sia interna che esterna, della superficie anteriore della cella. Importante è la scelta dei materiali di ricoprimento, sia che si tratti di un singolo strato che di doppio strato. È fondamentale ottimizzare la geometria e la composizione degli strati degli ARC in modo tale da minimizzare la riflessione esterna. Nella realtà l'implementazione di un ARC è difficilmente attuabile, perché occorre mettere in conto anche le impurità ed i costi sostenuti nella produzione delle celle. In aggiunta agli ARC, schemi geometrici di testurizzazione consentono di abbattere ulteriormente la riflessione esterna. In particolare sono stati discussi noti schemi di testurizzazione regolare quali V-groove bi-dimensionali (2-D) e piramidi tri-dimensionali (3-D) sia di tipo invertito che di tipo *upright*.

Nella parte finale dell'elaborato si discute l'analisi mediante simulazione numerica della propagazione elettromagnetica all'interno delle celle solari, in presenza o meno delle principali tecniche di *light trapping*, finalizzata al calcolo delle caratteristiche di riflettanza delle celle.

Le simulazioni effettuate, mediante metodi numerici di soluzioni delle *equazioni di Maxwell*, quali il *rigorous coupled-wave analysis* (RCWA) e il *raytracer* (RT), hanno in gran parte riportato risultati in linea con quelli attesi studiando la letteratura. Le celle a texture *V-groove* hanno dimostrato di portare a miglioramenti considerevoli di riflettanza rispetto alle superfici planari. Le piramidi invertite, ragionando sempre in termini di riflettanza, si sono rivelate strutture performanti, capaci di arrivare sino a valori al di sotto dello 0.10 per lunghezze d'onda inferiori ai 900nm. Risultati simili vengono conseguiti anche dalle piramidi *upright*, anche se la densità di corrente fotogenerata risulta lievemente inferiore. La presenza di un ARC ottimizzato, in particolare se multistrato, è ulteriormente vantaggioso in termini di riduzione della riflettanza su una significativa porzione dello spettro di irradiazione di interesse.

Sebbene le testurizzazioni a piramide regolare consentano di ottenere migliori prestazioni in termini di riflettanza relativamente alle altre strutture esaminate in questo lavoro, occorre fare attenzione al fatto che la procedura per la loro produzione risulta molto delicata e in alcuni casi complessa; infatti nel Paragrafo 2.6 è descritto come sia probabile la formazione di imperfezioni nelle piramidi, che portano poi ad un peggioramento delle prestazioni e ad una non regolare testurizzazione come prodotto finale. Per rendere agevole l'elaborazione dei calcoli, le non idealità non sono state prese in considerazione nella simulazione.

È importante quindi capire quale tecnica di *light trapping* adottare, in funzione del costo che si vuole sostenere e dell'efficienza di conversione finale che si desidera ottenere. Sicuramente una cella priva di testurizzazione e di ARC non è di interesse commerciale, a causa dell'alta riflettanza, mentre solo adottando una struttura 2-D o 3-D, eventualmente in combinazione con un ARC, è possibile incrementare significativamente il numero di fotoni intrappolati nel substrato.

Infine, nell'ipotesi di adottare substrati di spessore confrontabile a quello dei dispositivi commerciali del prossimo decennio, le prestazioni calcolate in termini di riflettanza delle celle solari in silicio cristallino sono prossime a quelle dei dispositivi attuali, a patto di sfruttare le tecniche note di *light trapping*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] http://www.conergy.it/portaldata/1/resources//italy/pdf/services/manuali_sc_hemi_def.pdf
- [2] http://itrpv.net/doc/roadmap_itrpv_2012_full_web.pdf
- [3] <http://pveducation.org/pvcdrom/design/light-trapping>
- [4] S.M. Sze, Kwok K.NG. *Physics of semiconductor devices*, Wiley, 2007
- [5] <http://www.tuttovista.net/occhi-salute/frame-dx-down-ofthalmiche-raggiUV.html>
- [6] J. Baker. *50 physics ideas you really need to know*. Quercus, 1st Edition, August 2, 2007
- [7] <http://62.149.164.30/isisquarengi/LinkClick.aspx?fileticket=V80W1EzZapc%3D&tabid=93&mid=620&language=en-US>
- [8] http://www.tutorcasa.it/articoli/solare_fotovoltaico.htm
- [9] <http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/single-crystalline-silicon>
- [10] M. A. Green. *Solar Cells*. Prentice-Hall, Inc., The University of New South Wales, December 1998

- [11] http://www.solar.udel.edu/ELEG620/05_Illuminatedpnjunction.pdf
- [12] <http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-of-light>
- [13] <http://www.physicsclassroom.com/class/light/u12l2c.cfm>

- [14] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/light-generated-current>
- [15] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>
- [16] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>
- [17] <http://www.ni.com/white-paper/7230/en>
- [18] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>

- [19] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>
- [20] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/efficiency>
- [21] <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>

- [22] Tom Markvart, Luis Castaner. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Elsevier November 13, 2003
- [23] <http://www.savitenergy.com/pv-technology-and-industry.html>
- [24] http://www.mibsolar.mater.unimib.it/?page_id=528
- [25] M. A. Green. *Silicon Solar Cells: advanced principles & practice*. Centre for Photovoltaic Devices and Systems Sydney, 1995
- [26] A. Luque and S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley and Sons Ltd, 2003
- [27] <http://pveducation.org/pvcdrom/design/anti-reflection-coatings>

- [28] L. Zhao, Y.H. Zuo, C.L. Zhou, H.L.li, H.W. Diao, W.J. Wang. *Theoretical investigation on the absorbtion enhancement of the crystalline silicon solar cells by pyramid texture coated with SiN_x:H layer*. Institute of Electrical Engineering, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, China. Available online 22 January 2011
- [29] <http://pveducation.org/pvcdrom/dlarc>
- [30] <http://www.sandia.gov/>
- [31] <http://pveducation.org/pvcdrom/design/light-trapping>
- [32] http://pvcdrom.pveducation.org/DESIGN/R_REFLECT.HTM
- [33] D. Redfield. *Solar cell with grooved surface*. Princeton, N.J., August 10, 1976
- [34] http://www.ntt-at.com/products_e/v-groove/
- [35] M. Geetha, P. Senthil kumar, R. Govindan, P. Ramu, L. Arivuselvam, P. M. Anbarasam. *Design of microlens focused V-groove textured silicon solar cell with different aspect ratio using Zemax*. Department of Physics, Periyar University, India. *Recent Research in Science Technology* 2010, 2(10): 05-08
- [36] E. Yablonovitch. *Statistical Ray Optics*, J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, pp. 899-907, 1982
- [37] P. Campbell, S.R. Wenham and Martin Green. *Improved Reflection and Light Trapping Using Tilted Pyramids and Grooves*. Proceedings, 4th International Photovoltaic Science and Engineering Conf., Sidney, February, 1989, pp. 615-620
- [38] V. Moroz, J. Huang, K. Wijekoon, D. Tanner. *Experimental and Theoretical Analysis of the Optical Behavior of Textured Silicon Wafer*. Synpsys, Inc., 700 East Middlefield Road, Mountain View, CA, USA. Applied Materials, Santa Clara, CA, USA
- [39] C.-J. Choi, J.-S. Kim, K. Moon, Y.-H. Kil, Y.-W. Ok, A. Rohatgi, S.-E. Park, D.-H. Kim. *Two-dimentional dopant profiling in POCl₃-diffused n+ emitter of textured silicon solar cells*. Athena, Ver. 5.18.1, Silvaco
- [40] P. Papet, O. Nichiporuk, A. Kaminski, Y. Rozier, J. Kraiem, J.-F. Lelievre, A. Chaumartin, A. Fave, M. Lemiti. *Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching*. Laboratoire de Physique de la Matière, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, available online 19 April 2006
- [41] K.S. Kunz and R.J. Luebbers. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. CRC Press, 1993.
- [42] I. Semenikhin, M. Zanucoli, M. Benzi, V. Vyurkov, E. Sangiorgi, C. Fiegna. *Computational efficient RCWA method for simulation of thin film solar cells*. *Optical and Quantum Electronics*, Vol.44, N.3-5 (2012), 149-154, DOI:10.1007/s11082-012-9560-5
- [43] http://www2.pv.infn.it/~biasi/dispense/capit23/cap23_nuovo.html

[44] J. Zhao, M.A. Green. *Optimized Antireflection Coatings for High-Efficiency Silicon Solar Cells*. IEEE transactions on electron devices, Vol.38, N.8, August 1991

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Grafico rappresentante il possibile andamento riguardante lo spessore dei wafer per celle solari, in base al tempo. Attualmente lo spessore è di circa 170µm, mentre per il 2020 si prevede una riduzione fino a 120µm [2].-----	7
Figura 2: Rappresentazione dello spettro solare. In particolare vengono messe in evidenza le lunghezze d'onda corrispondenti alla luce visibile dall'occhio umano, che indicativamente è racchiusa nell'intervallo tra 380nm a 760nm [5].-----	8
Figura 3: Rappresentazione schematica di una cella fotovoltaica irradiata dalla luce solare [8]. -----	9
Figura 4: Legge di Snell. Dimostrazione della rifrazione attraverso due mezzi differenti. -----	11
Figura 5: Grafico rappresentante il coefficiente di assorbimento in relazione alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa, riferito a diversi materiali semiconduttori [11]. -----	13
Figura 6: Andamento della caratteristica I-V fornita da una cella fotovoltaica (rosso) e della rispettiva potenza generata (blu). Si è evidenziato il punto rappresentante la corrente di corto circuito I_{SC} , ossia la massima corrente teoricamente erogabile dalla cella [14]. -----	15
Figura 7: Rappresentazione grafica relativa al flusso di fotoni in funzione della lunghezza d'onda, con spettro AM 0G e AM 1.5G [10]. -----	17
Figura 8: Grafico rappresentante la densità di corrente di corto circuito, in funzione del band gap del semiconduttore [10]. -----	17
Figura 9: Andamento della caratteristica I-V fornita da una cella fotovoltaica (rosso) e della rispettiva potenza generata (blu). Si è evidenziato il punto rappresentante la tensione di circuito aperto V_{OC} , ossia la massima tensione teoricamente erogabile [16]. -----	18
Figura 10: Caratteristica I-V di una cella solare, dove i rettangoli rappresentano il FF, determinati dalle potenze erogate dalla cella in rapporto alla massima potenza teorica [17]. -----	20
Figura 11: Circuito equivalente a parametri concentrati ad un diodo di una cella solare che comprende la resistenza di shunt, nonché la resistenza di serie [19]. -----	20
Figura 12: Grafico rappresentante l'efficienza in funzione del band gap del materiale. -----	21
Figura 13: Grafico rappresentante l'efficienza quantica di una cella solare in silicio in funzione della lunghezza d'onda. In condizioni ideali, l'efficienza può essere	

rappresentata come la curva color oro. Si noti inoltre che non verrà assorbita luce al di sotto del gap di banda, per cui l'efficienza a lunghezze d'onda troppo elevate sarà nulla [21].	22
Figura 14: Sezione trasversale di una cella MINP [22].	25
Figura 15: Struttura di una cella PESC [22].	26
Figura 16: Struttura di una cella PERL [23]. Sono in evidenza le piramidi invertite in qualità di texturing della superficie anteriore esposta alla radiazione.	28
Figura 17: Trend storici di costo per Watt per le celle solari in c-Si e volume di produzione [26].	29
Figura 18: Previsioni a lungo termine del picco di potenza della tecnologia fotovoltaica. I punti rappresentano il livello di penetrazione dell'elettricità per raggiungere gli obiettivi ambientali (vedi testo) [26].	30
Figura 19: ARC di spessore ottimale (sinistra), il cui dielettrico possiede una lunghezza d'onda di un quarto rispetto ai raggi incidenti: i raggi vengono trasmessi all'interno della cella. ARC senza spessore ottimale (destra): i raggi vengono riflessi all'esterno [27].	31
Figura 20: Grafico rappresentante la riflessione della luce da una cella in silicio senza ARC (tratteggio nero) e con due ARC differenti: in ossido di silicio e in ossido di titanio, di ugual spessore. Infine (tratteggio blu) la minor riflessione è provocata da un doppio ARC.	32
Figura 21: Rappresentazione grafica dell'andamento del coefficiente di riflessione, in presenza di una cella priva di ARC, di ARC singolo e DLARC. E' inoltre presentata la curva per una cella a singolo ARC e testurizzazione [22].	34
Figura 22: Rappresentazione schematica di differenti strutture della superficie posteriore: (da sinistra a destra) lega di alluminio BSF, diffusione locale BSF e giunzione flottante [22].	37
Figura 23 (a): In un wafer senza superficie testurizzata o un piano posteriore riflettente, la luce attraversa la cella solare una sola volta e fuoriesce dalla parte opposta [31].	38
Figura 24: Il light trapping utilizza un riflettore casuale posto nella superficie posteriore della cella. Se l'angolo di incidenza è inferiore all'angolo critico, allora la luce viene riflessa al di fuori della cella, altrimenti continua il suo percorso all'interno di quest'ultima [32].	39
Figura 25: Grafico dei valori di riflettanza calcolati per la lastra posteriore di alluminio di silicio, in funzione dello spessore di SiO_2 , per un angolo di incidenza interno variabile. In particolare, se l'angolo coincide con $\theta_c + \delta\theta$ e lo spessore dell'ossido è di 1mm, la riflettanza raggiunge il minimo valore [25].	40
Figura 26: Diagramma rappresentante le curve di assorbimento della cella, in assenza di texture (linea blu tratteggiata), e in presenza di tecniche di light trapping. La curva rossa, con valori di assorbimento alti a bassa energia del fotone, indica una testurizzazione di $2000\mu\text{m}$.	41
Figura 27: Percorso dei raggi, col metodo proposto da Redfield, in funzione della loro posizione di incidenza sulla superficie posteriore [25].	42

Figura 28: Particolare delle celle V-groove: a sinistra si trova la superficie alta della cella, a destra la sezione trasversale [34]. -----	43
Figura 29: Light trapping mediante texture V-groove con scanalature non oblique (in alto) e oblique (in basso) [25]. -----	44
Figura 30: Cella solare con V-groove nella quale la luce incidente viene riflessa dal contatto metallico nella faccia della scanalatura adiacente. [25] -----	44
Figura 31: Schema del modello V-groove di una cella solare, nella quale la luce viene guidata tramite una serie di microlenti [35]. -----	45
Figura 32: Dipendenza del rapporto di massimo assorbimento tra l'altezza delle scanalature e la loro larghezza [35]. -----	46
Figura 33: Variazione dell'altezza di massimo assorbimento, in base alla lunghezza d'onda, relativa a groove di $2.0\mu\text{m}$ di larghezza e $1.5\mu\text{m}$ di altezza [35].-----	46
Figura 34: Dissipazione di energia come frazione di potenza incidente [35]. ----	47
Figura 35: Tecnica di light trapping con V-groove, formata da un doppio strato parallelo alle stesse groove [25]. -----	47
Figura 36: Texture a piramidi regolari upright. -----	49
Figura 37: Texture con il tiler's pattern, che favorisce una maggiore image region [25].-----	50
Figura 38: Schema di una cella con tecnica perpendicularly groove [26]. -----	50
Figura 39: Grafico delle percentuali di passaggi effettuati dalla luce all'interno della cella, relative ad alcune tecniche di light trapping effettuate con double-side. Il numero di fotoni intrappolati è in funzione del numero di viaggi che effettua internamente alla cella [25].-----	51
Figura 40: Grafico delle percentuali di passaggi effettuati dalla luce all'interno della cella, relative ad alcune tecniche di light trapping effettuate con single side [25].-----	51
Figura 41: Densità di corrente di corto circuito in funzione dello spessore del wafer in silicio della cella solare, rispetto a diverse tecniche di light trapping [25]. -----	52
Figura 42: Percentuale di luce intrappolata in funzione al numero di passaggi che essa ha effettuato all'interno della cella. In particolare, il "periodic brickwork" indica il tiler's pattern. Prevalde sicuramente su tutte le altre, in percentuale, la tecnica della superficie randomizzata [25].-----	53
Figura 43: Grafico rappresentante il possibile andamento nella riduzione dello spessore del vetro per l'incapsulamento della cella solare [2].-----	54
Figura 44: Rappresentazione di una texture in silicio formata da 100 piramidi di misure casuali, sovrapposte l'un l'altra, che ricoprono un'area di $400\mu\text{m}^2$ [38]. -	55
Figura 45: Texture a geometria piramidale regolare in silicio: lo schema rappresentante un singolo elemento e relative condizioni al contorno di riflessione. La luce ultravioletta, a lunghezza d'onda di $0.3\mu\text{m}$ è parzialmente assorbita dal silicio, l'altra parte viene riflessa dalla superficie [38]. -----	56

Figura 46: La luce visibile di lunghezza d'onda di $0.6\mu\text{m}$ è parzialmente assorbita dal silicio, parzialmente riflessa all'esterno e un'ultima parte trasmessa attraverso il wafer [38].-----	57
Figura 47: Luce infrarossa di lunghezza d'onda di $0.9\mu\text{m}$ parzialmente assorbita dal wafer, parzialmente riflessa da esso e trasmessa all'esterno della struttura. [38]-----	57
Figura 48: Simulazione della riflettanza di luce ultravioletta visibile per piramidi regolari e random[38].-----	58
Figura 49: Illustrazione teorica della vista frontale delle texture regular e random pyramid [38].-----	58
Figura 50: Simulazione che riporta una più scarsa riflettanza della texture a random pyramids con medesima altezza della regular pyramids [38].-----	59
Figura 51: Confronto della texture random e artificiale, viste trasversalmente. Il dominio di simulazione ha dimensioni laterali di $20\mu\text{m}$ per $20\mu\text{m}$ [38].-----	59
Figura 52: Rappresentazione schematica degli assi cartesiani del dominio spaziale di calcolo del simulatore RCWA con il vettore di propagazione dell'onda piana (k_1) individuato dagli angoli ϑ e φ .-----	65
Figura 53: Rappresentazione degli angoli formati da un'onda quando questa subisce uno scattering su di una interfaccia con materiali di differente indice di rifrazione.-----	67
Figura 54: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a superfici planari differenti, con SLARC di spessore di 75.65nm , e DLARC di spessore di 109.31nm (MgF_2) e 60.38nm (TiO_2).-----	68
Figura 55: Rappresentazione dell'angolo di apertura preso in considerazione nelle simulazioni delle texture V-groove e di piramidi. α_2 rappresenta l'angolo tra due piani (facce) inclinati. La base della V-groove è mantenuta a $10\mu\text{m}$ mentre, al variare di α_2 varia l'altezza della groove.-----	70
Figura 56: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture V-groove senza ARC (modo TE), con spessore $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$.-----	70
Figura 57: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture V-groove senza ARC (modo TM), con spessore $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$.-----	71
Figura 58: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture V-groove, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC, con spessore del wafer di $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$ (modo TE).-----	72
Figura 59: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture V-groove, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC, con spessore $100\mu\text{m}$ e base $10\mu\text{m}$ (modo TM).-----	72
Figura 60: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture inverted pyramid senza ARC, con base di $10\mu\text{m}$ e altezza delle piramidi differenti, a seconda dell'angolo α_2 .-----	73
Figura 61: Risultati delle simulazioni di celle c-Si relative a texture upright pyramid senza ARC, con base di $10\mu\text{m}$ e altezza delle piramidi differenti, a seconda dell'angolo α_2 .-----	74

Figura 62: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a texture inverted e upright pyramid, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC. ----- 75

Figura 63: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a bare silicon e a texture differenti di tipo periodico (periodo $10\mu\text{m}$), con angolo α_2 pari a 70.6° , senza ARC, spessore substrato $100\mu\text{m}$.----- 76

Figura 64: Risultati della simulazione di una cella c-Si relativa a bare silicon e a texture differenti, con angolo α_2 pari a 70.6° , in presenza di Si_3N_4 ARC.----- 77

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture simulate differenti senza ARC e in presenza di ARC, con spessore del wafer di silicio di $100\mu\text{m}$, base $10\mu\text{m}$ 78

Tabella 2: Densità di corrente foto generata (J_{ph}) relativa a texture V-groove senza ARC, con spessore del wafer di silicio di $100\mu\text{m}$, base della groove di $10\mu\text{m}$ 78

Tabella 3: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture inverted pyramid senza ARC, con spessore del wafer di silicio di $100\mu\text{m}$, base della piramide di $10\mu\text{m}$ 79

Tabella 4: Densità di corrente fotogenerata relativa a texture upright pyramid senza ARC, con spessore del wafer di silicio di $100\mu\text{m}$, base della piramide di $10\mu\text{m}$ 79



Ce l'hai fatta a vedermi da là?