

Università degli studi di Padova

Corso di laurea in Ingegneria Aerospaziale

PROPRIETÀ E TECNICHE DI DEPOSIZIONE DI SILICIO AMORFO PER CELLE SOLARI IN FILM SOTTILE

Laureando

Zamboni Michele

Relatore
Prof.ssa Bertani Roberta

Anno accademico
2021/2022

INDICE

1. Introduzione cella fotovoltaica
2. Struttura silicio amorfo
3. Tecnologie di deposizione silicio amorfo
4. Tecnologie di deposizione CVD per silicio amorfo
 - 4.1 RF-PECVD ad alta pressione e potenza
 - 4.2 HF-PECVD
 - 4.3 MW-PECVD
 - 4.4 HWCVD
 - 4.5 ETPCVD
5. Conclusioni

1. INTRODUZIONE CELLA FOTOVOLTAICA

La cella solare è semplicemente un **diodo**, costituito da un **materiale semiconduttore** che permette di assorbire l'energia dei raggi solari e di trasformarla in energia elettrica.

In figura possiamo osservare lo schema generale di una cella solare (non in scala). Questa è formata da una giunzione di materiale semiconduttore di tipo p e di tipo n. Il contatto nella parte esposta al sole (superiore) è formato da una griglia metallica che permette alla luce di penetrare nel dispositivo, mentre tra le linee della griglia viene depositato un materiale che riduce la riflessione della luce.

Quando un fotone con un energia sufficientemente alta colpisce un elettrone della superficie, questo può liberarsi dall'atomo a cui è legato creando dietro di sé una lacuna, ovvero un “buco” carico positivamente e in valore uguale e contrario a quello dell'elettrone. Elettroni e lacune, che chiameremo anche portatori liberi, sono separati e raccolti dalla cella solare in modo che percorrano una specifica direzione, generando così una corrente elettrica.

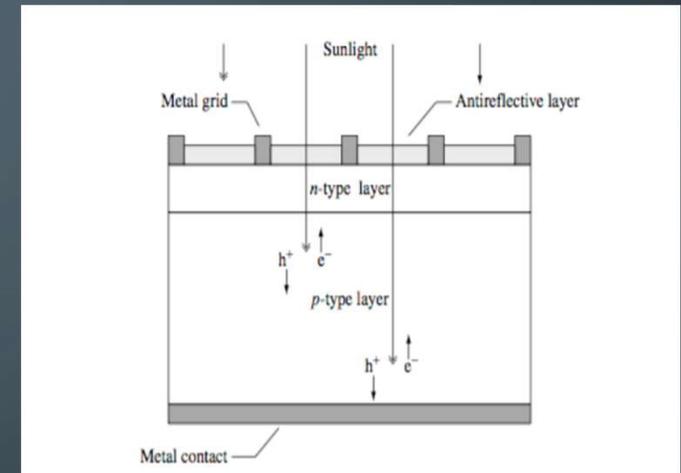


Figura 1.1 Struttura cella fotovoltaica

2. STRUTTURA SILICIO AMORFO

Un materiale amorfo presenta una struttura chimica simile a quella che si trova in una struttura cristallina con la differenza che il reticolo risulta del tutto disordinato.

Sia nel silicio amorfo che in quello cristallino, infatti, ogni atomo di Si è legato ad altri quattro atomi, tuttavia, è necessaria la presenza di legami diversi da quelli tra due atomi di Silicio (per eliminare la struttura cristallina). Una grossa percentuale di atomi nel Silicio Amorfo, utilizzato per la produzione di celle solari, forma tre legami con altrettanti atomi di silicio, mentre il quarto legame è effettuato con un atomo di Idrogeno, permettendo così la formazione di un reticolo del tutto disordinato.

In figura 2.1 possiamo osservare una rappresentazione del reticolo disordinato, ove posso formare un legame con un idrogeno, nella così detta **fase diluita**, o due legami con due idrogeni differenti chiamata **fase di accumulo**

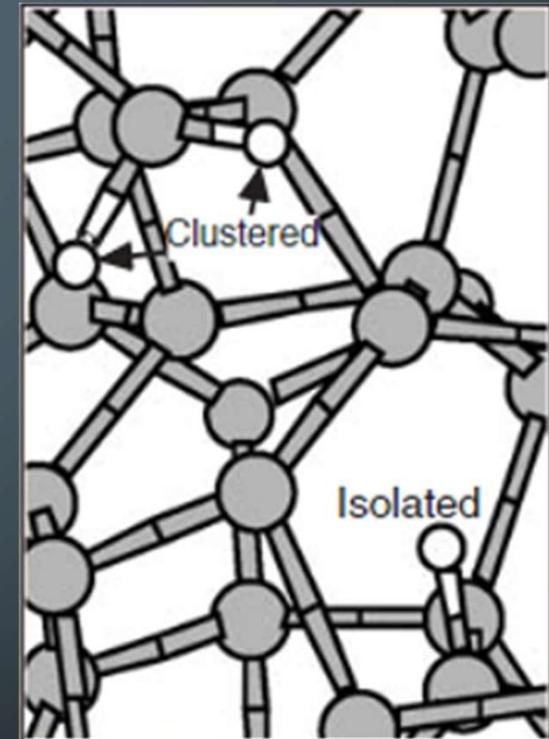


Figura 2.1: Rappresentazione del reticolo disordinato del silicio amorfo. (dal libro "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering")

2. STRUTTURA DEL SILICIO AMORFO

Nella fase diluita un atomo di idrogeno si trova distante almeno un nanometro da un altro atomo del suo stesso tipo, mentre nella fase di accumulo due o più atomi di idrogeno possono essere legati allo stesso atomo di silicio aumentando così la densità dei difetti all'interno del materiale.

Questo tipo di silicio amorfo, chiamato **silicio amorfo idrogenato (α -Si:H)**, viene ottenuto dall'idruro di silicio o silano **SiH₄**, tramite un procedimento chiamato **scarica a bagliore**.

Questo processo viene utilizzato generalmente nelle lampade al neon, dove un gas viene sottoposto ad una corrente elettrica che eccita le molecole gassose le quali per eccesso di energia emettono fotoni. Con questa tecnica, chiamata anche deposizione al plasma, si può produrre un silicio amorfo con caratteristiche favorevoli all'utilizzo fotovoltaico.

Il drogaggio è possibile aggiungendo al silano (SiH₄), fosfina gassosa PH₃, per il tipo n, o diborano gassoso B₂H₆ per il tipo p durante la deposizione. Il silicio amorfo ottenuto tramite scarica a bagliore contiene una percentuale significativa di atomi d'idrogeno, e sono proprio questi che garantiscono le buone proprietà fotoelettriche, inoltre la tecnologia di fabbricazione è relativamente semplice e molto meno costosa rispetto a quella della crescita cristallina.

3. TECNICHE DI DEPOSIZIONE PER SILICIO AMORFO

I primi strati di Silicio amorfo sono stati depositati mediante una scarica a bagliore in radiofrequenza utilizzando Silano (SiH_4). Da allora sono stati studiati molti altri metodi di deposizione per migliorare la qualità dell' α -Si:H e aumentare il tasso di deposizione. I metodi usati per la deposizione di film-sottili possono essere divisi in due gruppi:

- **Il primo gruppo include metodi che formano α -Si:H da una fase gassosa mediante decomposizione del gas contenente silicio e sono noti come metodi di deposizione chimica da vapore (CVD).**
- **Il secondo gruppo rappresenta i metodi di deposizione fisica in cui gli atomi di silicio per la crescita di α -Si:H sono ottenuti spruzzando un bersaglio di silicio (Sputtering)**

La tecnica di Sputtering per α -Si:H non è comunemente usata e quindi non trattata in dettaglio in questa sede. Il metodo della scarica a bagliore a radiofrequenza, invece, oggi noto come rf-PECVD, è ancora il metodo più comunemente utilizzato, sia in laboratorio che su scala industriale. **Il collo di bottiglia della tecnica rf PECVD è il suo tasso di deposizione relativamente basso $R_d \approx 1\text{-}2 \text{ \AA/s}$ (Angstrom/ secondo $\approx 0,1 \text{ nm/s}$).**

La PECVD (Plasma-enhanced chemical vapor deposition o **deposizione di vapore chimico potenziata al plasma**): è il processo attraverso cui si procede alla formazione di film nanometrici portando il materiale dallo stadio gassoso a quello solido. **Il ruolo del plasma è quello di fornire energia per dissociare il gas contenente silicio, ciò avviene per collisione con gli elettroni originati nel plasma accelerati in un campo elettrico.** Parte dell'energia trasferita tra le molecole di Silano nelle collisioni di elettroni viene irradiata come luce visibile, per questo motivo questa tecnica è chiamata anche scarica a Bagliore.

La crescita di un film- sottile si ottiene attaccando particelle reattive di Silano dissociato, chiamate radicali, alla superficie del film in crescita, e poiché lo spessore del film α -Si:H per le applicazioni del dispositivo è di circa mezzo micrometro, α -Si:H deve essere depositato su un substrato appropriato.

Il sistema di deposizione PECVD è relativamente semplice ed è costituito da 3 parti principali (vedi figura):

- Una camera di reazione a vuoto con elettrodi paralleli accoppiati capacitativamente e substrato
- Un sistema di gestione della pressione e dei flussi di gas stessi (SiH_4 e H_2), necessari alla deposizione degli strati intrinseci e drogati
- Sistema di scarico con uno scrubber o un bruciatore per l'elaborazione del gas in uscita

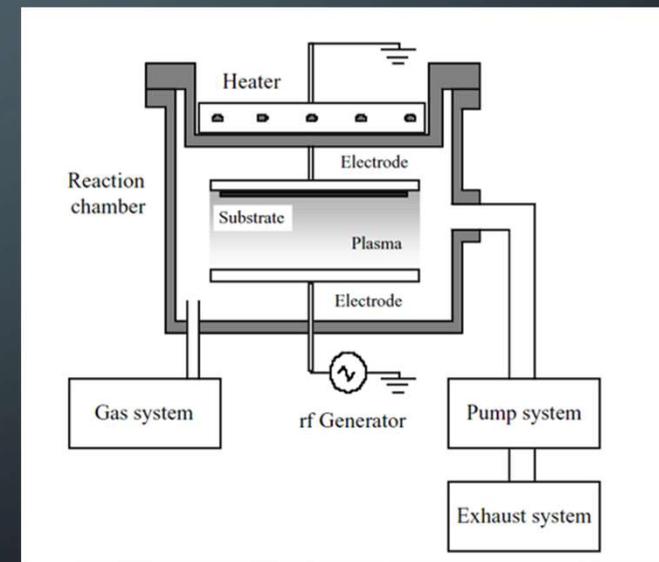


Figura 4.1 struttura PECVD

La deposizione di uno strato di α -Si:H da un plasma di silano può essere descritta come un processo in quattro fasi o di α -Si:H :

- **Le reazioni primarie nella fase gassosa. Le molecole di SiH_4 vengono decomposte per eccitazione da impatto di elettroni del plasma, generano: radicali neutri, molecole, ioni positivi, negativi ed elettroni.**
- **Le reazioni secondarie nel plasma, tra molecole, ioni e radicali determinano la formazione di specie reattive e infine in grandi cluster silicio-idrogeno, descritti in letteratura come particelle di polvere. Le specie neutre si diffondono nel substrato, gli ioni positivi bombardano il film in crescita e gli ioni negativi sono intrappolati all'interno del plasma.**
- **Interazione dei radicali con la superficie del film in crescita, come diffusione radicalica**
- **Rilascio di idrogeno nel sottosuolo e il rilassamento della rete di silicio.**

Il radicale SiH_3 è generalmente considerato il radicale dominante nella crescita di α -Si:H. Poiché la maggior parte del substrato in crescita termina con l'idrogeno, il radicale SiH_3 non si lega facilmente al film in crescita ma si diffonde sulla superficie fino a quando non incontra un legame penzolante. Legandosi al legame penzolante, il radicale SiH_3 contribuisce alla crescita.

Il legame del SiH_3 alla superficie in crescita richiede legami penzolanti disponibili, che vengono creati quando l'idrogeno viene rimosso dalla superficie tramite eccitazione termica o per astrazione da un radicale SiH_3 , in cui si formano un legame penzolante e una molecola SiH_4 .

Sebbene altri radicali contribuiscano molto meno alla crescita, svolgono un ruolo importante nel determinare le proprietà del film. I radicali **SiH_2 e silano superiori** hanno coefficienti di adesione più elevati rispetto a SiH_3 e possono essere incorporati direttamente nella superficie che termina con l'idrogeno. **Tuttavia, il contributo di questi radicali alla crescita si traduce in film di scarsa qualità, e quindi la presenza di questi radicali nel plasma dovrebbe essere evitata.**

In conclusione, il processo di deposizione è un fenomeno complesso di reazioni gassose e superficiali che sono controllate da parametri di deposizione come la composizione del gas, i flussi e la pressione, la densità di potenza e la frequenza, la temperatura del substrato e la geometria dell'elettrodo.

I parametri di deposizione tipici per ottenere film uniformi di qualità in a-Si:H mediante un sistema di deposizione PECVD di laboratorio sono: flusso di silano **20–50 sccm** , pressione di processo **0,5–0,7 mbar**, temperatura del substrato **200–250C** ° (Il processo a bassa temperatura consente l'uso di una varietà di materiali a basso costo come substrato, come vetro, acciaio inossidabile e fogli di plastica flessibile), densità di potenza RF 20–50 mW/cm², distanza degli elettrodi 1–3 cm.

A queste condizioni si ottiene un tasso di deposito tipico è 1–2 Å/s, Questo è il collo di bottiglia principale che ci si è trovati a dover risolvere, quando si ridimensiona la tecnologia su scala industriale un tasso di deposizione così basso diventa un problema importante, e viene generalmente richiesto un tasso di 10 – 20 Å/s.

Un importante vantaggio invece è la bassa temperatura di deposizione, generalmente compresa tra 200 e 250 C °. Il processo a bassa temperatura consente l'uso di una varietà di materiali a basso costo come substrato, come vetro, acciaio inossidabile e fogli di plastica flessibile.

Il parametro centrale che regola la velocità di deposizione è la potenza assorbita dal plasma. Una maggiore potenza si traduce in una maggiore densità elettronica e temperatura, che facilita la dissociazione delle molecole di SiH₄. **Le concentrazioni più elevate risultanti di SiH₃ e altri radicali contribuiscono a un tasso di deposizione più elevato. Tuttavia, l'aumento della potenza porta a condizioni di deposizione che favoriscono la generazione di radicali silanici più elevati e, infine, la formazione di polvere.** Queste condizioni di deposizione danno come risultato film di qualità inferiore caratterizzati da una maggiore concentrazione di legami H e SiH₂ nello stesso. Al fine di facilitare la formazione di un reticolo di Si compatto in condizioni di alto tasso di deposizione, è auspicabile la soppressione della formazione di legami SiH₂. **Ciò può essere ottenuto abbassando la temperatura degli elettroni nel plasma e/o aumentando la temperatura di deposizione.** È possibile ottenere una temperatura elettronica inferiore nel plasma utilizzando una frequenza di eccitazione del plasma più elevata. È necessaria un'elevata temperatura di deposizione fino a 350 ° C a velocità di deposizione elevate per promuovere l'eliminazione dell'idrogeno dalla superficie in crescita. Tuttavia, una temperatura di deposizione così elevata per gli strati assorbenti provoca danni termici agli strati sottostanti nelle celle solari.

4. TECNICHE DI DEPOSIZIONE PECVD

La soppressione dei radicali silanici più elevati e dei radicali di breve durata nella fase gassosa a un'elevata velocità di deposizione è diventato un approccio generale per depositare α -Si:H con una qualità del materiale sufficiente. Al fine di ottenere tassi di deposito più elevati, sono stati adottati due approcci:

- Sono state ulteriormente studiate le **condizioni operative** della tecnica PECVD.

- 4.1 rf- PECVD ad alta pressione ed alta potenza

- 4.2 vhf-PECVD (alta frequenza)

- 4.3 mw-PECVD a microonde

- Ci si è concentrato sullo studio e lo sviluppo di **nuove tecniche di deposizione:**

- 4.4 HWCVD, Hot Wire CVD, nota anche come CVD catalitica

- 4.5 ETPCVD Expand Thermal plasma CVD.

4.1 RF-PECVD AD ALTA PRESSIONE E ALTA FREQUENZA

Mediante questa tecnica i film sottili fabbricati utilizzando il regime ad alta pressione di deposizione (**5–10 mbar**) e densità di potenza rf elevata (**270– 530 mW/cm²**) da miscele di gas sorgente di silano e idrogeno si ottiene una velocità di deposizione di **12 Å/s**.

Celle solari a-Si:H a giunzione singola con assorbitori a-Si:H depositati a **190 ° C** e $R_d = 12 \text{ Å/s}$ hanno raggiunto un'efficienza stabilizzata del **6,5 %**.

L'ampio gap di banda e il corrispondente alto V_{oc} (tipicamente 0,88–0,9 V) rendono queste celle a-Si:H ad alto tasso candidati interessanti per le celle solari impilate a-Si:H/a-Si:H o a-Si:H/a-SiGe:H.

La tecnica consiste nel trovare la combinazione migliore tra pressione e frequenza per ottimizzare la deposizione del film sottile senza andare a compromettere l'efficienza della cella stessa

4.2 VHF-PECVD

Vhf- PECVD (deposizione di vapore chimico potenziata con plasma ad altissima frequenza).

I ricercatori dell'Università di Neuchâtel hanno studiato l'influenza dell'aumento della frequenza di eccitazione del plasma da 13,56 MHz a 150 MHz. **Hanno dimostrato che aumentando la frequenza di eccitazione a 70 MHz a potenza plasmatica costante, la velocità di deposizione aumenta in modo monotono da 3 a 10 Å/s, mantenendo film a-Si:H di buona qualità.** Il passaggio a frequenze di eccitazione più elevate modifica la funzione di distribuzione dell'energia degli elettroni nel plasma, il che porta a un tasso di dissociazione più rapido dei gas sorgente e quindi a tassi di deposizione più elevati.

Utilizzando la tecnica vhf-PECVD, i ricercatori dell'Università di Neuchâtel hanno recentemente fabbricato una cella p-i-n a-Si:H con **un'efficienza stabilizzata del 9,5%, che è la massima efficienza stabilizzata raggiunta per celle p-i-n in a-Si:H.** Il tasso di deposizione per lo strato intrinseco a-Si:H era di circa 5 Å/s. Questa cella ha uno spessore dello strato assorbente di soli $\sim 0,25 \mu\text{m}$ e rivela una densità di corrente di cortocircuito stabilizzata molto elevata, di oltre 17,5 mA cm⁻². La cella è stata depositata su un substrato di vetro rivestito e anche la cattura della luce è stata migliorata applicando un rivestimento antiriflesso (AR).

Mitsubishi Heavy Industries ha sviluppato un apparato vhf-PECVD ad ampia area implementando un elettrodo a forma di scala e utilizzando un metodo di modulazione di fase. **La frequenza base nel processo è 60 MHz e l'altra frequenza viene selezionata in base al grado di uniformità della deposizione. Il tasso di deposito medio è 11 Å/s e l'uniformità dello spessore è mantenuta entro $\pm 18\%$. Sono stati sviluppati moduli p-i-n in silicio amorfo con un'efficienza stabile dell'8%.**

Le principali sfide per applicare vhf PECVD su scala industriale sono:

- (i) l'uniformità degli strati depositati su un grande substrato quando l'effetto delle onde elettriche stazionarie ad alte frequenze (>60 MHz) ne limita l'applicazione
- (ii) Trovare l'efficace accoppiamento della potenza al plasma.

4.3 MW-PECVD

La MW-PECVD, o tecnica di deposizione a scarica a bagliore **nella frequenza delle microonde di 2,45 GHz**, produce tassi di deposizione molto elevati.

Quando il plasma MW, però, è a diretto contatto con il substrato, i film depositati mostrano scarse proprietà optoelettroniche rispetto ai film depositati in rf e non sono adatti come strati intrinseci per celle solari ad alta efficienza. **Per superare il problema i substrati vengono posti al di fuori della regione del plasma.**

Il plasma MW viene utilizzato per eccitare o decomporre un gas vettore come He, Ar o H₂ che passa attraverso la zona a MW verso i substrati. Il gas vettore eccitato **eccita a sua volta il SiH₄ o il Si₂H₆** diretto nella camera vicino ai substrati. Utilizzando un tale processo di eccitazione indiretta, **la concentrazione di radicali SiH₃ può essere mantenuta elevata**, mentre le concentrazioni di altri radicali (SiH₂, SiH, ecc.) possono essere ridotte al minimo.

In generale, le proprietà strutturali e optoelettroniche dei film a base di a-Si depositati con MW sono inferiori rispetto ai film depositati con rf. Tuttavia, **ad un tasso di deposizione molto elevato, anche 50 °Å/s, i film depositati MW saranno relativamente superiori ai film realizzati con deposizione RF e VHF sebbene tutti saranno inferiori a quelli realizzati <10 °Å/s.**

La deposizione di plasma MW è già stata utilizzata da Canon nella loro linea di produzione a tripla giunzione da 10 MW.

4.4 HW-CVD

La CVD a filo caldo **si basa sulla dissociazione delle molecole di gas mediante una reazione di cracking catalitico su un filamento caldo**. Una camera di deposizione HW-CVD da laboratorio nella sua forma più semplice può essere realizzata simile a una PECVD (vedi Figura 4.1), dove **i filamenti sostituiscono l'elettrodo rf**. I filamenti sono solitamente realizzati in tungsteno e posti in prossimità del supporto del substrato. La decomposizione di SiH_4 in singoli radicali di silicio e idrogeno è efficiente per temperature del filamento **superiori a 1600°C** . I radicali di Silicio successivamente si diffondono all'interno della camera e si depositano su un substrato riscaldato a $150/450^\circ\text{C}$

I film depositati a 30 \AA/s e ad una temperatura del substrato di 380°C hanno mostrato una bassa densità di difetti di circa $10/16 \text{ cm}^{-3}$ e un basso contenuto di H: meno del 5% atomico. Il basso contenuto di idrogeno, fino all'1% atomico, suggerisce che questi film dovrebbero essere stabili contro la degradazione indotta dalla luce. **Le celle solari record a giunzione singola p-i-n $\alpha\text{-Si:H}$ con uno strato assorbente HWCVD depositato a $16,5 \text{ \AA/s}$ avevano un'efficienza iniziale del 9,8%. Recentemente, celle solari p-i-n $\alpha\text{-Si:H}$ a giunzione singola depositati a 32 e 16 \AA/s hanno raggiunto le efficienze iniziali rispettivamente del 7,5 e 8,5%.** Le notevoli caratteristiche del processo HWCVD lo rendono molto interessante per le produzioni industriali: il suo alto tasso di deposizione, l'elevato utilizzo del gas, il processo a bassa pressione che evita la formazione di polvere, la sua ampia area di deposizione ottenuta mediante l'uso di più filamenti.

La tecnica HWCVD per la produzione deve superare **i problemi relativi alla deposizione uniforme su un'ampia area, la durata e l'invecchiamento del filamento e la contaminazione degli strati dai filamenti**. Sviluppi recenti mostrano che questi problemi possono essere risolti con successo, infatti la società giapponese Anelva è riuscita ad introdurre un sistema HWCVD per la deposizione di grandi aree.

4.5 ETPCVD

La tecnica di deposizione di vapore chimico al plasma termico in espansione (ETPCVD) si definisce a plasma remoto perchè la generazione del plasma e la deposizione del film sono separate spazialmente. La configurazione consiste in una sorgente di plasma ad alta pressione (tra i 200 e i 700 mbar) e una camera di deposizione a bassa pressione (tra i 0,1 e 0,3 mbar).

Il plasma è generato da una miscela di gas non depositanti come Argon e/o Idrogeno e il SiH_4 puro viene iniettato da un anello di iniezione diversi centimetri sotto l'ugello di espansione dove viene dissociato dal flusso di plasma, vedi figura 5.1. Il flusso di Idrogeno gioca un ruolo importante nella crescita di $\alpha\text{-Si:H}$ di buona qualità poiché determina la disponibilità dell'idrogeno atomico responsabile della generazione dei radicali SiH_3 .

Per depositare $\alpha\text{-Si:H}$ di buona qualità a velocità elevate (sopra i 70 \AA/s) devono essere utilizzate temperature intorno ai 400°C , questa necessità nasce dalla competizione tra le velocità di deposizione e i processi di diffusione superficiale durante la crescita. Si è osservato che l'applicazione di una polarizzazione rf esterna al substrato durante la deposizione consente di diminuire la temperatura di deposizione di circa 100°C preservando buone proprietà di assorbimento.

Per la fabbricazione delle celle solari mediante questa tecnica è stato costruito un sistema di 3 camere a vuoto chiamato **CASCADE**. Una camera di blocco del carico, una rf-PVCD per la deposizione degli strati drogati e una camera ETPCVD per la crescita degli strati intrinseci. Una singola giunzione $\alpha\text{-Si:H}$ creata utilizzando questa metodologia depositando a 250°C e $R_d = 11 \text{ \AA/s}$ ha recentemente raggiunto un'efficienza iniziale dell' 8%

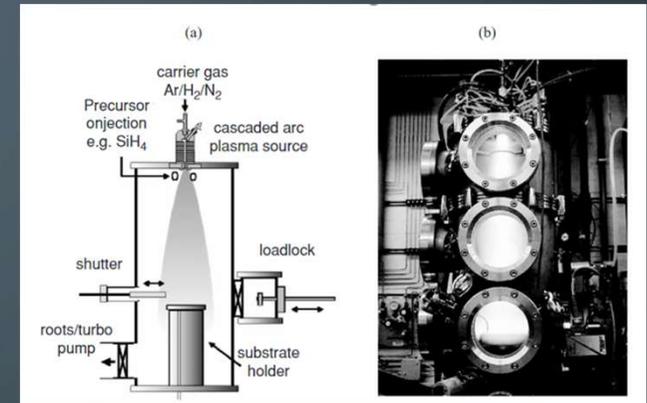


Figura 5.1 struttura ETPCVD

5 CONCLUSIONI

Tutte queste diverse tecniche, appunto, cercano di trovare il giusto compromesso tra velocità di deposizione (per rendere le celle industrialmente realizzabili) e qualità della cella stessa.

Una pressione più bassa è desiderabile per realizzare una deposizione uniforme, mentre una più alta è maggiormente desiderabile per ottenere tassi di crescita più elevati.

Una maggiore potenza è desiderabile per una maggiore velocità di deposizione. Tuttavia, al di sopra di 100 mW/cm^2 , le rapide reazioni nel gas possono creare una polvere di poli-idruro di silicio che contamina il film di Si in crescita. Questo problema può essere mitigato utilizzando una pressione molto bassa o una forte diluizione dell'idrogeno, che si traducono entrambe in un tasso di crescita ridotto.

La temperatura del substrato è generalmente impostata tra 150 e 350 °C. Diminuendo la temperatura aumento la quantità di H incorporato nel film, questo aumenta leggermente il gap di banda di $\alpha\text{-Si:H}$. Tuttavia, una temperatura del substrato inferiore (<150 °C) esacerba la formazione di polvere di poli-idruro. Invece ad una temperatura del substrato più elevata (>300 °C), viene incorporato meno idrogeno e il gap di banda si riduce leggermente. Questi effetti sono attribuiti al miglioramento termico della diffusività superficiale degli atomi durante la crescita.

Table 12.1 Various deposition processes used for depositing amorphous silicon-based materials

Processes	Maximum rate ^a [Å/s]	Advantages	Disadvantages	Manufacturers	Reference
RF PECVD	3	High quality, uniform	Slow	Many	[77–79]
DC PECVD	3	High quality, uniform	Slow	BP Solar	[66, 67]
VHF PECVD	20	High quality, fast especially for nc-Si	Poor uniformity	Oerlikon Solar, Sharp	[68, 94]
Microwave PECVD	100	Very fast	Film quality not as good	Canon	[70]
Hot-wire	50	Very fast	Poor uniformity	None	[71, 72]
Photo-CVD	1	High quality	Slow	None	[73, 74]
Sputtering	3		Poor quality, slow	None	[75, 76]

^aMaximum deposition rate: the deposition rate beyond which the film quality deteriorates rapidly; these numbers are empirical, not fundamental limits, and represent current results at the time of publication.

Figura 6.1 confronto tecniche di deposizione $\alpha\text{-Si}$

Sebbene i vantaggi dell'utilizzo della deposizione VHF per una crescita ad alto tasso di crescita siano stati chiaramente dimostrati, ci sono due sfide principali nell'applicazione della deposizione VHF nella produzione:

- (1) La deposizione non uniforme si verifica su un substrato su larga scala di produzione a causa delle onde stazionarie RF formate quando la dimensione dell'elettrodo è paragonabile a un quarto della lunghezza d'onda dell'onda RF.
- (2) L'uniformità richiede anche grande attenzione quando si accoppia la potenza VHF dal generatore agli elettrodi di grandi dimensioni e dagli elettrodi al substrato.

L'HWCVD invece è considerato molto promettente, infatti è stata dimostrata la creazione di celle solari con un'efficienza iniziale di ~10%. Sebbene non sia stato ancora incorporato in nessuno degli odierni impianti di produzione su larga scala, la capacità di depositare film α -Si e α -SiGe a velocità molto elevate (~ fino a $150 - 300^\circ \text{A/s}$) ha attratto enorme interesse. Un altro motivo per cui i ricercatori sono interessati all'HW CVD è la sua efficacia nella produzione di film in nc-Si e silicio policristallino.

Come menzionato in precedenza oltre ai metodi di deposizione PECVD e HW, sono stati esplorati altri processi di deposizione. Elencherò solo quelli per i quali sono stati riportati i risultati delle celle solari:

- Deposizione mediante sputtering utilizzando una miscela di Idrogeno e Argon;
- Foto-CVD mediante eccitazione ultravioletta;
- Deposizione di vapore chimico al plasma a distanza;
- Deposizione a getto di gas.

Questi metodi di deposizione o producevano film α -Si più poveri rispetto a quelli con tecniche rf-PECVD, oppure non possono essere facilmente ridimensionati per fornire film uniformi ad ampia area, pertanto non sono (o non ancora) utilizzati per la produzione in scala di film in α - Si.

6. BIBLIOGRAFIA

- Luque A. Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd.
- Poortmans J. Arkhipov V. Thin film solar cell: fabrication, characterization and John Wiley & Sons, Ltd.. ISBN: 0-470-09126-6
- Bube Richard H. Photovoltaic Materials, series on properties of semiconductor materials, Imperial College, London 2006