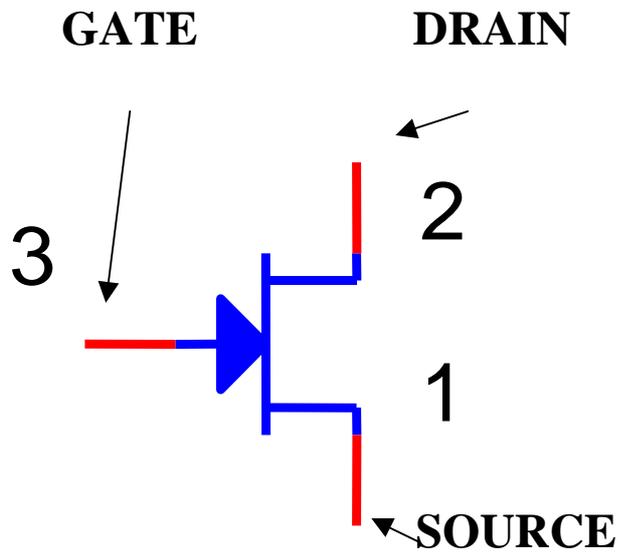
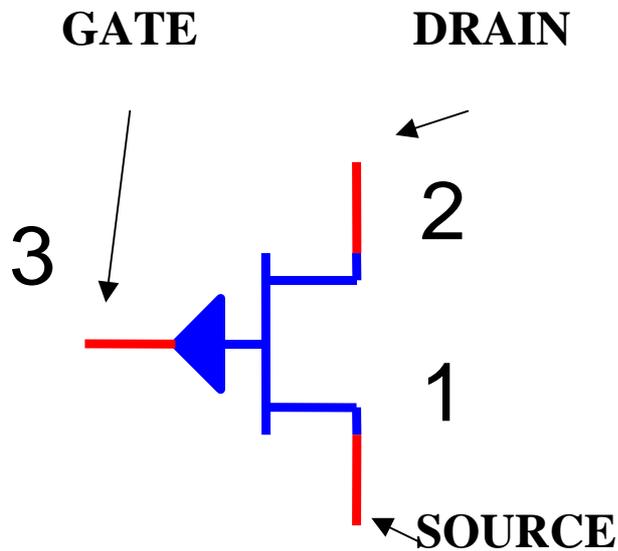


corrente di gate è nulla (per la precisione è una piccolissima corrente dovuta ai portatori di carica minoritari che attraversano la giunzione fra gate e canale), in quanto, come abbiamo implicitamente dimostrato nel corso della trattazione, tale dispositivo va utilizzato tenendo sempre le giunzioni di gate in polarizzazione inversa.

Il simbolo circuitale di un JFET a canale n è il seguente



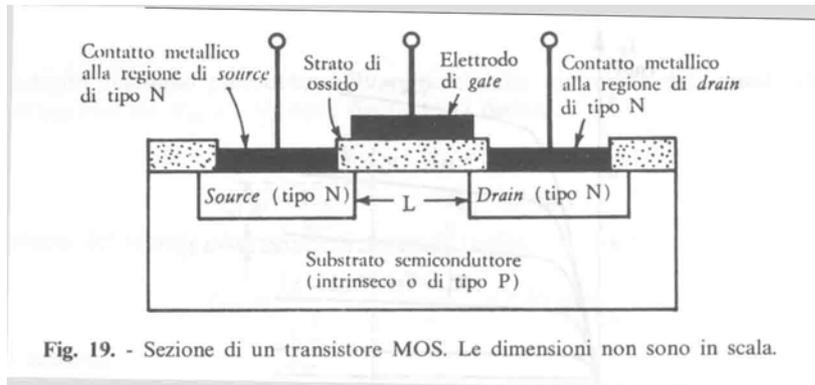
Il simbolo di transistor JFET a canale P è invece il seguente



Un'applicazione - Il transistor MOSFET

MOSFET enhancement mode

Anche questo transistor è unipolare. Il suo nome è un acronimo per Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. La struttura di principio del dispositivo è rappresentata nella figura seguente

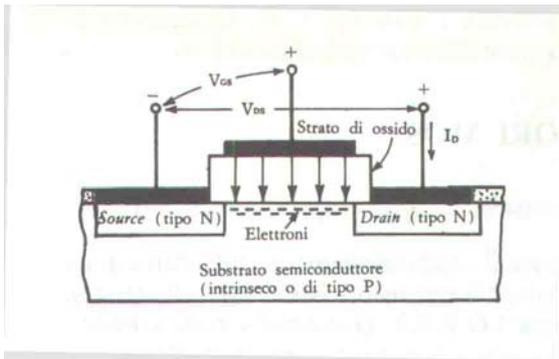


Anche nel caso del MOSFET abbiamo due tipi di transistor: a canale n e a canale p. Quello rappresentato in figura è il MOS a canale n. La struttura di principio del MOS a canale P si ottiene semplicemente invertendo il drogaggio delle diverse zone individuate nel dispositivo. Come al solito descriviamo il dispositivo facendo riferimento soltanto ad una delle tipologie possibili, quella a canale n. Come si può notare dalla figura, abbiamo una barretta intrinseca (cioè non drogata) o drogata di tipo p, detta substrato. Nella parte superiore del substrato sono ricavate due zone drogate di tipo n. In corrispondenza di tali zone sono realizzati dei contatti metallici per ricavare i morsetti rispettivamente di Source e Drain. Fra i due morsetti, al di sopra del substrato è realizzato uno strato di diossido di silicio (SiO_2). Tale strato di ossido ha proprietà isolanti, è un dielettrico. Al di sopra dello strato di ossido abbiamo un ulteriore elettrodo detto di Gate.

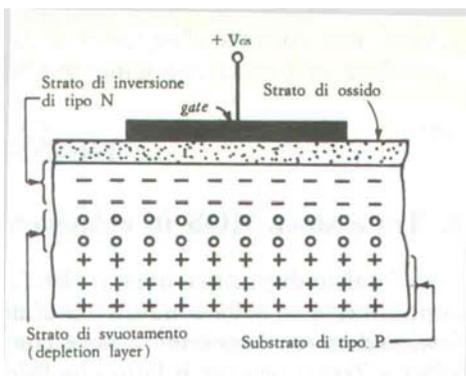
Anche se non appare in figura, anche il substrato è in genere metallizzato e collegato al morsetto di Source.

A differenza del JFET se colleghiamo una batteria fra Source e Drain del MOSFET, non abbiamo un passaggio di corrente, poiché il percorso fra i due elettrodi non è drogato in maniera omogenea, ma abbiamo due giunzioni pn, la prima fra zona di Source e substrato e la seconda fra substrato e Drain. Se volessimo far passare una corrente di elettroni fra S e D, dovremmo porre una batteria fra i due elettrodi col positivo verso il morsetto D polarizzando inversamente la seconda giunzione. Se invertissimo i collegamenti della batteria verrebbe polarizzata inversamente la prima giunzione. In entrambi i casi non avremmo passaggio di correnti apprezzabili.

Per consentire la circolazione di corrente dovremo porre una batteria fra Source e Gate in modo da portare il Gate a tensione superiore rispetto al Source e al substrato.

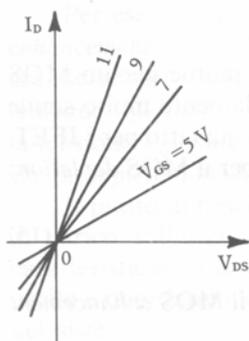


Ora basta notare che il sistema costituito dall'elettrodo di Gate e dal semiconduttore con lo strato di dielettrico interposto, costituisce una sorta di condensatore in cui si genera un campo elettrico le cui linee di forza vanno dal Gate al substrato. Tale campo elettrico attira elettroni dalle due zone n, al di sotto dello strato di diossido di silicio. L'arrivo di un sufficiente numero di elettroni in tale regione comporta la creazione di una zona di tipo N nel substrato che collega la zona di Source e la zona di Drain. Questa zona si troverà a tensione superiore rispetto al resto del substrato quindi si avrà una nuova giunzione polarizzata inversamente con relativa zona di svuotamento che la isolerà dal resto del substrato.



La zona ricca di elettroni che si è formata prende il nome di *strato di inversione di carica* proprio ad indicare che da zona P, grazie all'arrivo di elettroni, è diventata zona N.

Adesso si è realizzato un canale fra il Source e il Drain che consente il passaggio di corrente, inserendo una batteria fra i due morsetti, in modo da avere una tensione $V_{DS} > 0$. Come nel caso del JFET, per piccoli valori della tensione V_{DS} si ha un comportamento lineare del dispositivo. Esso si comporta sostanzialmente come una resistenza il cui valore dipende dalla lunghezza del canale e dalla sua sezione.



Al crescere della tensione V_{GS} il canale si arricchisce sempre più di elettroni, la resistenza che esso offre diventa sempre più piccola e la caratteristica che lega I_D e la V_{DS} ruota in direzione dell'asse delle ordinate.

Anche nel caso del MOSFET notiamo che le caratteristiche si mantengono costanti soltanto per piccoli valori di V_{DS} mentre tendono a incurvarsi e diventare quasi parallele all'asse delle ascisse

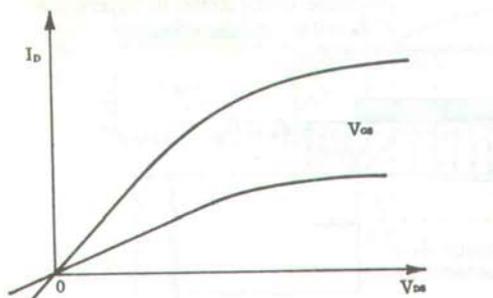
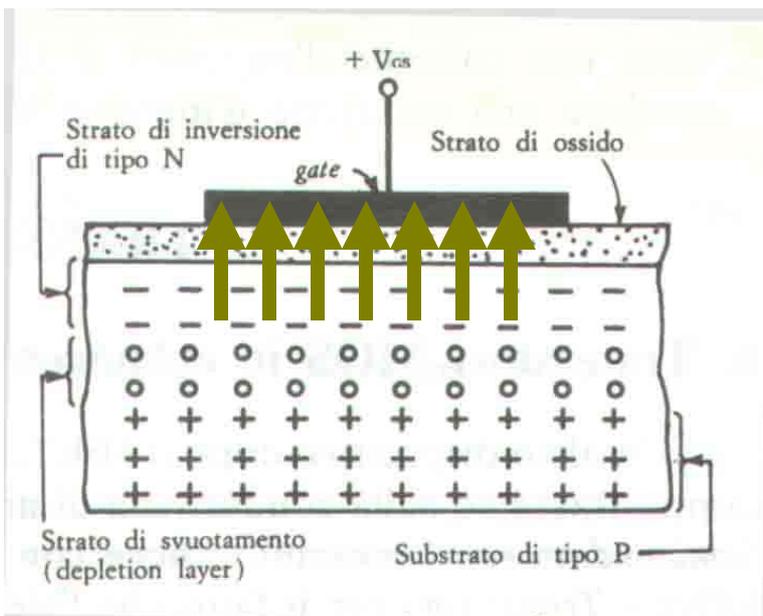
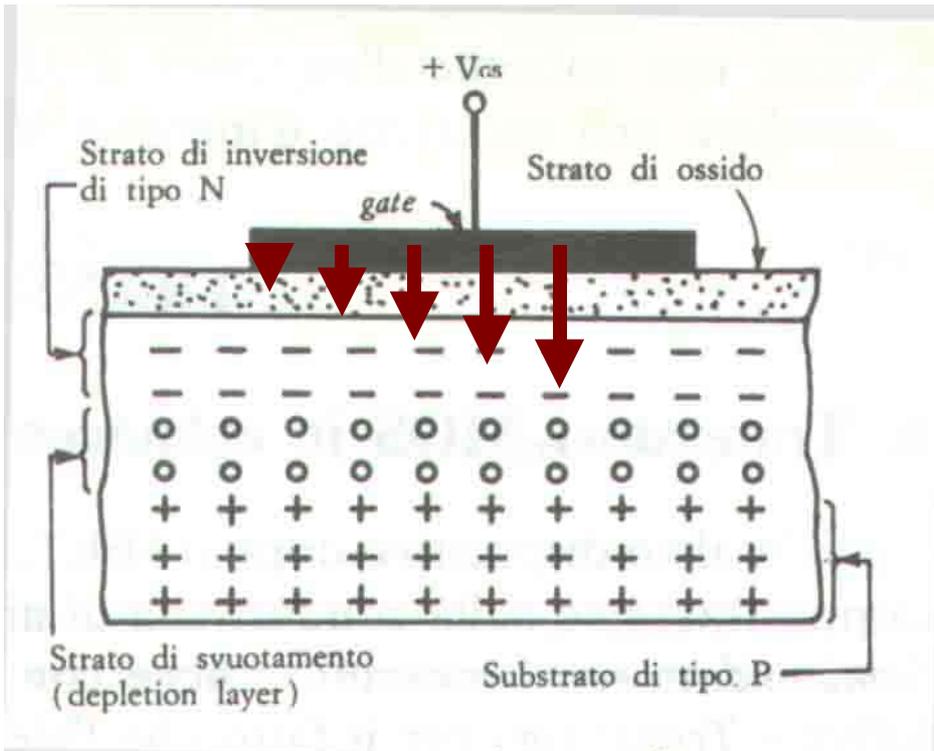


Fig. 22. - Caratteristiche di *drain* per due diversi valori di V_{GS} .

Per spiegare questo fenomeno consideriamo separatamente gli effetti delle due batterie. Se consideriamo $V_{GS} > 0$ e $V_{DS} = 0$ abbiamo tensioni che vanno dal substrato al gate



tali tensioni sono costanti lungo tutto il canale. Consideriamo ora $V_{GS} = 0$ e $V_{DS} > 0$. In tal caso vuol dire che Source e Gate sono cortocircuitati. Si può fare allora lo stesso ragionamento fatto per il JFET e giungere alla conclusione che se i punti del canale si trovano a tensione superiore rispetto al Source, essi si trovano a tensione superiore anche rispetto al Gate. Tali tensioni poi aumentano in modulo via via che procediamo verso il drain



Se consideriamo l'effetto complessivo delle due batterie, abbiamo che la tensione fra il gate e i punti del canale diminuisce sempre più avvicinandosi al drain per cui il canale non avrà sempre la stessa sezione, ma questa diminuirà avvicinandosi al drain

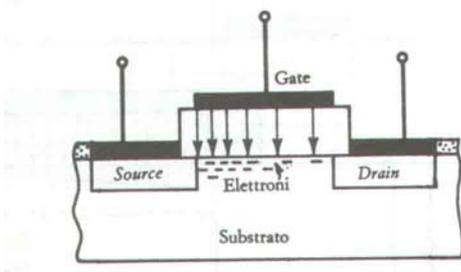
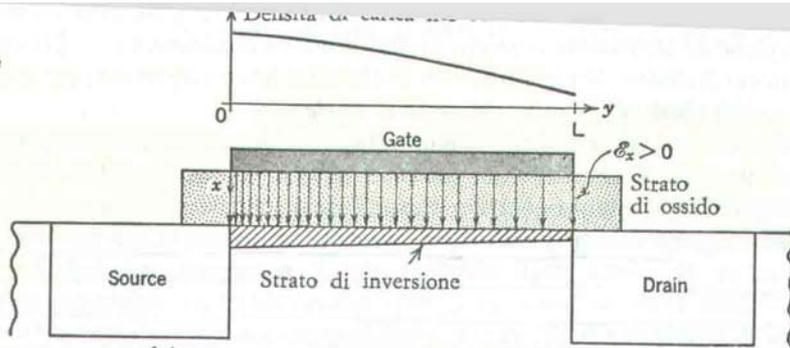
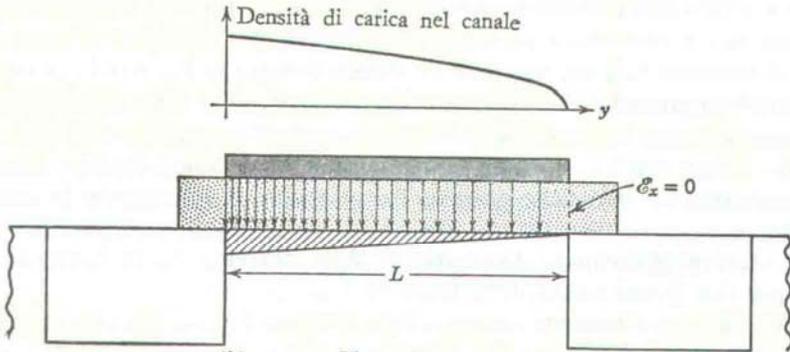


Fig. 23. - Distribuzione non uniforme del campo elettrico quando la tensione *drain-source* non è più trascurabile rispetto a V_{GS}

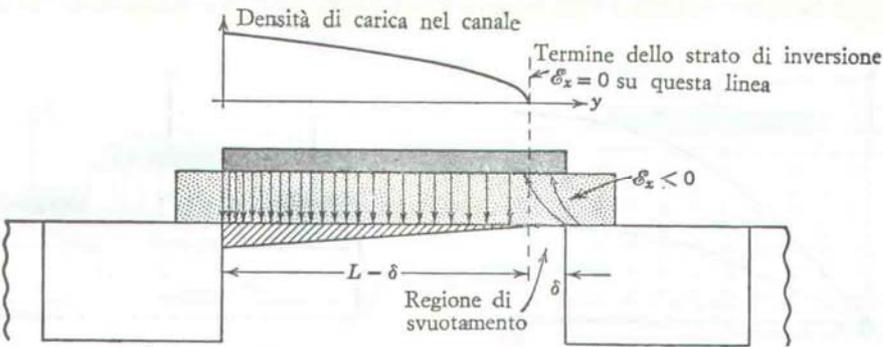
ciò significa che all'aumentare della V_{DS} la resistenza del canale aumenta e la caratteristica si incurva. Se la tensione V_{DS} supera il valore di pinch-off il canale si apre e, come nel caso del JFET, la corrente diventa quasi costante



(a) V_{DS} minore di V_{GS} ($V_{DS} = 0,8 V_{GS}$)

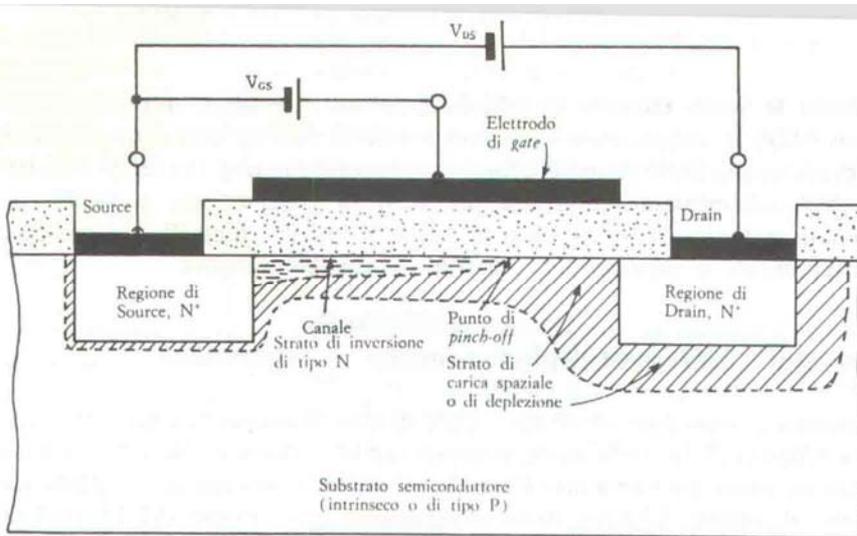


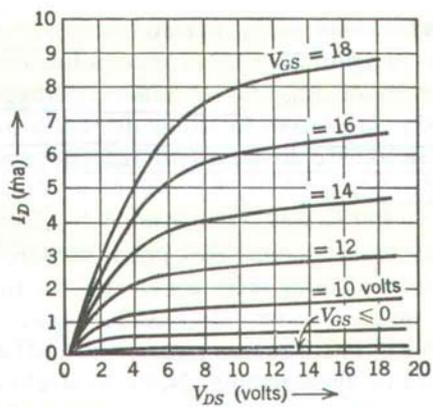
(b) $V_{DS} = V_{GS}$



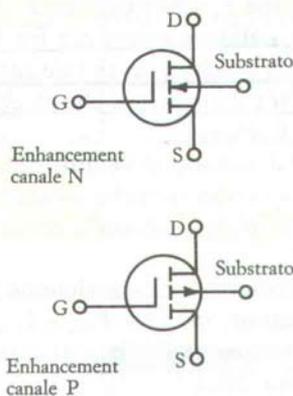
(c) V_{DS} maggiore di V_{GS} ($V_{DS} = 1,5 V_{GS}$)

Fig. 24. - Rappresentazione del campo elettrico nell'ossido, della densità di carica nel canale e della configurazione del canale per tre diversi valori di V_{DS} .



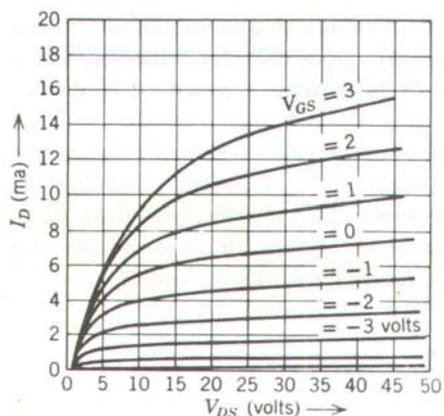


Questo transistor è detto MOSFET enhancement mode o MOSFET ad arricchimento. Il simbolo circuitale del MOSFET enhancement mode è il seguente

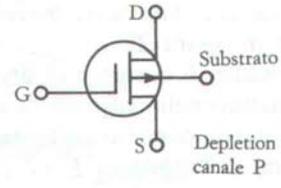
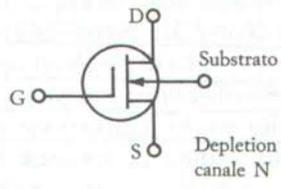


MOSFET depletion mode

Esiste un secondo tipo di MOSFET detto depletion mode. La struttura di principio è identica, ma vi è la differenza che, in tal caso, il canale fra Source e Drain già esiste perché realizzato per drogaggio dal costruttore. Ciò vuol dire che anche se la V_{GS} è nulla si può avere una circolazione di corrente nel dispositivo. In tal caso la V_{GS} può essere positiva (si allora un allargamento del canale e correnti più elevate) o negativa (si restringe il canale e si hanno correnti più piccole)



il simbolo circuitale è il seguente



Un'applicazione - L'energia Fotovoltaica



Introduzione

L'energia fotovoltaica ultimamente ha fatto un bel salto di qualità, si è passati infatti dalle piccole superfici sufficienti a produrre l'energia elettrica per un faro su uno scoglio, alle grandi superfici come interi tetti di palazzi cittadini. Il processo che genera l'energia fotovoltaica sfrutta la capacità propria di alcuni materiali di generare elettricità quando sono colpiti dalla radiazione solare

La radiazione solare

La radiazione solare è l'energia elettromagnetica emessa dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto nel sole sotto forma di energia raggiante. Saremmo portati a pensare che il sole irraggia energia attraverso la luce; in realtà essa è costituita da onde elettromagnetiche aventi frequenza elevatissima. Di tutte queste onde elettromagnetiche, quelle che principalmente ci occorrono sono quelle aventi lunghezza d'onda compresa tra 0,2 e 0,3 μm , comprese nello spettro ottico che va dall'ultravioletto all'infrarosso, la cui massima intensità viene riscontrata in corrispondenza della lunghezza d'onda di circa 0,5 μm , all'interno dello spettro visibile che si estende da 0,4 a 0,8 μm . Dovendo analizzare la sua interazione con la materia, piuttosto che la sua propagazione, è indispensabile considerare la luce come composta da quanti, ovvero particelle di energia elettromagnetiche, noti con il nome di fotoni.

L'intensità della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera terrestre è pari a circa 1353 W/m^2 ; tale valore viene sensibilmente ridotto sulla superficie della terra a causa dell'effetto dell'atmosfera, fino a raggiungere il valore massimo di circa 1000 W/m^2 , che corrisponde al massimo irraggiamento al suolo

nelle condizioni ottimali. L'intensità e la distribuzione spettrale della radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre infatti dipendono dalla composizione dell'atmosfera. Durante l'attraversamento di essa, l'irraggiamento subisce vari effetti:

una parte viene diffusa in tutte le direzioni dell'incontro, dalle molecole di ossigeno, azoto, vapore acqueo, anidride carbonica, ozono;

una parte viene riflessa principalmente dalle nuvole;

una parte viene assorbita dalle molecole stesse dell'aria e dal pulviscolo atmosferico;

Il rimanente raggiunge la superficie della Terra e prende il nome di radiazione diretta.

Le celle fotovoltaiche

Possiamo facilmente comprendere quanto il sole sia fondamentale da un punto di vista energetico, anche perché l'energia solare è un'energia pulita e rinnovabile che permette di abbattere l'emissione di CO₂ nell'ambiente e così diminuire l'effetto serra.

Dobbiamo quindi analizzare come si fa a trasformare un'energia proveniente dal sole in energia più utile e pratica, come cercare di immagazzinarla nelle ore notturne o per i giorni poco soleggiati. Per trasformare direttamente la luce solare in energia elettrica si usa la tecnologia fotovoltaica. Essa sfrutta il cosiddetto effetto fotovoltaico.

I differenti tipi di celle

Le celle fotovoltaiche sono fatte da sottili fette di silicio spesse da 0.3 a 0.5 mm di forma circolare, rettangolare o ottagonale. Le due superfici della cella vengono metallizzate per permettere il loro collegamento elettrico. Nella parte da esporre al sole, la metallizzazione assume la forma tipica di una griglia per lasciare dello spazio per la penetrazione della luce solare. Si differenziano basilarmente tre tipi di celle a seconda della struttura del cristallo: monocristalline, policristalline e amorfe.

Per la produzione di celle monocristalline si utilizzano semiconduttori dotati di una struttura altamente pura che ne determina buona parte del loro costo. Dalla massa fusa di silicio si tagliano delle barre monocristalline che vengono in seguito tagliate in sottili placche. Questo metodo di produzione garantisce un assorbimento della luce e la raccolta delle cariche prodotte ottimale.

La produzione di celle policristalline è meno onerosa: in questo caso la massa di silicio viene fusa in blocchi, i quali infine vengono tagliati a dischetti. Durante il processo di solidificazione si formano delle strutture cristalline di differenti dimensioni che presentano sulla loro superficie alcuni difetti. Di conseguenza, il rendimento di questo tipo di celle è inferiore al precedente.

Si parla di celle a silicio amorfo o celle a film sottile quando su un substrato di vetro o di altro materiale viene spruzzato un sottile strato di silicio. Lo spessore dello strato di silicio è inferiore a 1 μm: ne risulta

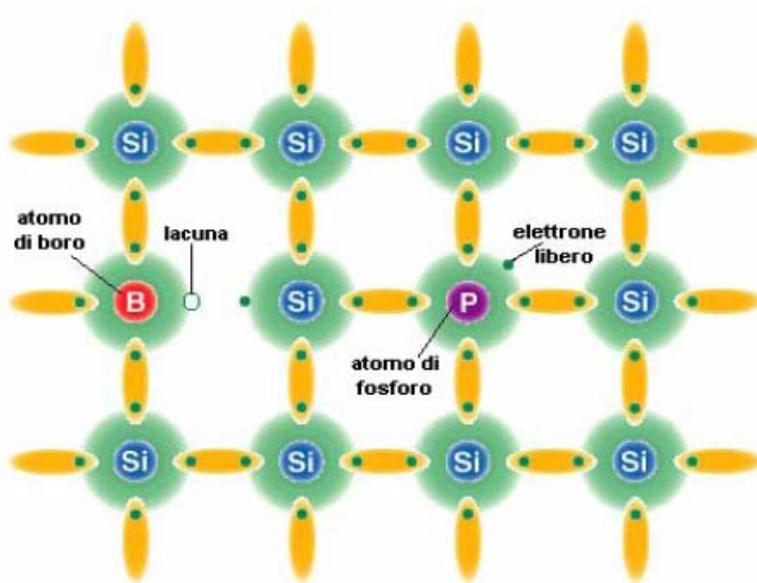
un costo del materiale molto basso e di conseguenza un basso costo di produzione. Questo tipo di cella ha il rendimento minore, ma si adatta anche in caso di irradiazione diffuso. Le celle amorfe vengono generalmente utilizzate per alimentare apparecchi portabili o come elementi di facciate fotovoltaiche.

Esistono anche altri tipi di celle solari in commercio e altri in via di sperimentazione. Una cella molto usata è la cella di Arseniurio di Gallio per il suo ottimo rendimento. Infatti, pur essendo tossica, trova molte applicazioni in satelliti spaziali, dove l'energia del sole è l'unica fonte di energia disponibile e grazie alle sue alte prestazioni diventa possibile ridurre le dimensioni dei pannelli solari.

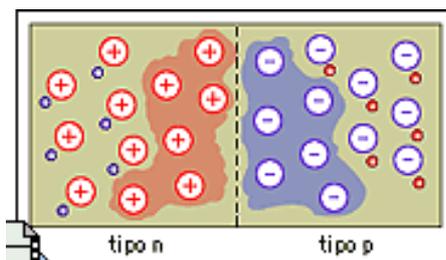
Le caratteristiche principali dei diversi materiali per le celle fotovoltaiche possono essere indicate dalla seguente tabella:

Caratteristiche	Si monocristallino	Si multicristallino	Si amorfo
Rendimento cella	14-17%	12-14%	4-6% singolo 7-10%tandem
Vantaggi	-Alto rendimento, -stabile tecnologia -affidabile	-Minore rendimento e costo - fabbricazione più semplice -migliore occupazione dello spazio	-Costo minore -minore necessità di materiale ed energia nella fabbricazione -buon rendimento anche con basso irraggiamento -flessibile
Svantaggi	-Costo elevato, -quantità di materiale necessaria alla fabbricazione -complessità	-Complessità -sensibilità alle impurità	-Basso rendimento -Degrado iniziale -Stabilità negli anni

Principio di funzionamento



Una cella fotovoltaica non è altro che l'elemento più semplice a semiconduttore: il diodo. Esso è costituito da un cristallo di tipo N, che essendo costituito da alcuni atomi trivalenti, presenterà delle lacune pronte ad essere occupate da elettroni e per tanto, presenterà degli ioni negativi o accettori e un cristallo di tipo P, che essendo invece costituito da alcuni atomi pentavalenti, presenterà degli elettroni liberi e quindi degli ioni positivi o donatori. La sola congiunzione di questi cristalli, provoca una corrente di diffusione senza che venga applicato alcun campo elettrico. Tale fenomeno, è dovuto al gradiente di concentrazione, cioè alla concentrazione non omogenea di cariche, che tendono a spostarsi lì dove sono meno concentrate. Si avrà quindi una corrente di lacune dalla zona P alla zona N e una corrente di elettroni dalla zona N alla zona P.

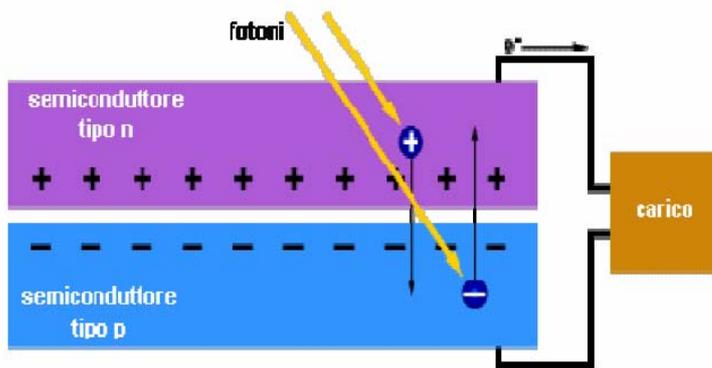


Nel momento in cui le due cariche si incontrano a cavallo della giunzione, si ha il fenomeno della ricombinazione che provoca la scomparsa di elettroni e lacune e la permanenza nella zona di svuotamento di ioni positivi e negativi. Si viene così a creare un campo elettrico (E) dalla carica positiva a quella negativa cioè dalla zona drogata di tipo N a quella drogata di tipo P.

Nasce una barriera di potenziale che consente il passaggio della corrente di diffusione solo in una direzione, a seconda che il campo imposto dall'esterno, sia maggiore o minore di quello interno.

Conversione fotovoltaica

Un fotone che colpisce un materiale semiconduttore, può provocare la liberazione di un elettrone di valenza. Se un fotone colpisce un normale strato di cristallo, questo elettrone libero vagherà un po' per il reticolo cristallino, ma presto o tardi si legherà di nuovo a un atomo. È necessario invece che questo elettrone libero non si ricombini subito a una lacuna, ma possa raggiungere i contatti elettrici all'estremità della cella. Entra in gioco la caratteristica del diodo; quest'ultimo, facilitando il passaggio della corrente in una sola direzione, non permette all'elettrone di ritornare al suo atomo originario. Infatti, quando un fotone colpisce un atomo nella zona di giunzione PN, esso subirà una accelerazione nella zona di congiunzione del diodo in un senso preciso. In questo modo, l'elettrone non tornerà più al suo atomo originario ma dovrà fare un'altra strada: attraverserà la zona N, fino a raggiungere il contatto elettrico. Ora, se all'estremità dei cristalli P e N colleghiamo, per mezzo dei terminali un carico, l'elettrone sarà costretto a passare attraverso il carico. In questo modo avremo generato energia elettrica per mezzo di un fotone.



Come si costruiscono

Le celle solari sono in realtà il frutto di un procedimento di costruzione molto complesso. Attualmente le celle solari più comuni sono quelle costruite con il silicio, che è l'elemento più diffuso sulla crosta terrestre dopo l'ossigeno. Tuttavia, per essere sfruttato, deve presentare un'adeguata struttura molecolare (monocristallina, policristallina o amorfa) e un elevato indice di purezza, caratteristiche che non possono trovarsi in natura nei minerali da cui viene estratto.

Si distinguono diversi tipi di silicio in base al grado di purezza: silicio di grado elettronico (con concentrazione di impurezze di circa una parte su cento milioni), silicio solare (con grado di impurezza di circa una parte su dieci mila), e silicio di grado metallurgico circa (una parte su 100).

Il silicio di grado metallurgico viene ottenuto nella silice contenuta nella sabbia, mediante riduzione dei forni ad arco. Il silicio elettronico impiegato nella costruzione di componenti di uso comune, deve

essere estremamente puro con struttura monocristallina, a tale scopo sono state sviluppate diverse tecnologie che permettono di ottenere il silicio di grado elettronico. Tali processi, anche se costosi non sono molto onerosi perché incidono poco nella produzione del prodotto finito.

Fortunatamente per realizzare una cella solare il silicio deve avere una purezza inferiore a quella necessaria per produrre circuiti integrati.

METODI DI CREAZIONE DELLE CELLE FOTOVOLTAICHE

Esistono vari metodi per la creazione delle fette di silicio che servono per la creazione di celle fotovoltaiche: di seguito vengono descritti quelli più frequentemente utilizzati.

METODO CZOCHRALSKY

Questo metodo consente di ottenere il silicio monocristallino a partire dal silicio policristallino di grado elettronico. In un crogiolo contenente silicio fuso viene immesso un “seme” di silicio monocristallino in lenta rotazione. Il seme cristallino viene lentamente estratto e, controllando opportunamente la velocità di estrazione, si regola il diametro del lingotto e si concentrano le impurità nella parte inferiore di esso. Il lingotto viene sagomato in forma cilindrica e tagliato a fette.

METODO EFG

Il metodo EFG consiste nell'ottenere un nastro di silicio monocristallino mediante un processo di trafilatura. Il nastro viene ottenuto mediante il passaggio attraverso una fessura in cui sale il silicio liquido.

Esistono alcuni problemi riguardo la purezza del cristallo dovuti al fatto che il silicio fuso si presenta come ottimo solvente e pertanto raccoglie le impurità della trafilatura. Comunque con il metodo EFG sono state ottenute celle con rendimento del 13%.

METODO CASTING

Il metodo casting è un processo produttivo di celle fotovoltaiche, a partire dal silicio scartato delle industrie elettroniche. Le fasi produttive consistono nella minuta frammentazione del materiale seguita da un'operazione di decapaggio per una prima parziale purificazione delle impurità superficiali.

Il materiale viene quindi fuso e colato nelle forme (casting) in cui avviene una successiva ricristallizzazione.

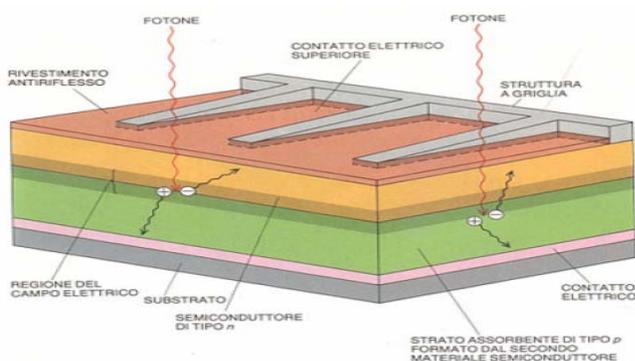
Le operazioni di fusione, colaggio e cristallizzazione sono particolarmente critiche. Il problema che si presenta, e che è poi tipico di tutta la tecnologia di produzione dei semiconduttori, è quello della necessità di ridurre al minimo il tasso di impurezze presenti nel materiale per ottenere il migliore rendimento durante la conversione fotovoltaica. È questo il motivo per cui, a tutt'oggi, si possono permettere la fusione di colate di al massimo 100 Kg e per un tempo non inferiore a 24 h.

Dopo la cristallizzazione si procede alla squadratura del blocco per togliere le asperità meccaniche e per togliere le impurità che i processi precedenti hanno fatto addensare sulla superficie del monocristallo. Dalla massa si ottengono quindi vari lingotti che verranno affettati per la realizzazione dei cosiddetti "wafer", dallo spessore sottilissimo.

Sulle fette viene effettuata una prima operazione di drogaggio di tipo P (boro) e successivamente una nuova operazione di drogaggio ma di tipo N (fosforo).

Le operazioni di drogaggio avvengono in appositi forni a temperature dell'ordine dei 900 °C e la quantità di atomi e la profondità della giunzione vengono regolate dalla permanenza nel forno a diffusione.

Una volta ottenuta la giunzione P-N si devono effettuare le metallizzazioni sul fronte e sul retro: la prima deve essere realizzata in modo che si possa realizzare il migliore compromesso tra elevata trasparenza alla luce e basso valore di resistenza, per mantenere alto il rendimento di conversione fotovoltaica. La seconda metallizzazione non deve rispondere a questi requisiti, non essendo esposto alla luce e viene pertanto esteso a tutta la superficie.



Entrambe le metallizzazioni possono venir fatte per evaporazione sotto vuoto o per serigrafia. Il primo processo, più economico, è il più utilizzato per la fabbricazione di celle commerciali; il secondo, più costoso, consentendo rese di conversione più alte viene utilizzato solo per le applicazioni speciali come la costruzione di celle per usi spaziali.

Una volta che si sono realizzati i contatti metallici, il fronte della cella viene ricoperto da uno strato di materiale antiriflettente dello spessore di circa 0,8 μm., che serve a permettere alla giunzione di non riflettere i fotoni incidenti e quindi, di assorbire tutta la luce aumentando ulteriormente il rendimento di conversione. La cella in fine viene inglobata tra strati di vetro e silicone che dovranno essere il più trasparente possibile.

Indice analitico

A

Arseniurio di Gallio; 101
atomi donatori; 51; 52; 67
atomo; 6; 7; 9; 10; 11; 16; 17; 18; 19; 20; 23; 24; 25; 44; 47;
49; 50

B

Balmer; 23
banda di conduzione; 19; 45; 56
banda proibita; 18; 19
bande di energia; 16; 18; 50
Bohr; 11; 12; 20; 24; 25

C

cammino libero medio; 50
celle a film sottile; 100
celle a silicio amorfo; 100
celle fotovoltaiche; 56
conduttività; 51; 52; 53; 54; 55
conduttori; 4; 19; 45
configurazione elettronica dello stato fondamentale; 37
Conversione fotovoltaica; 103
Corrente di diffusione; 57
costante di Planck; 30
costante di Plank; 25
curva di sensibilità spettrale; 56

D

densità di carica; 51
Densità di carica; 51
densità di corrente; 50
Drain; 82; 85; 86; 92; 93; 97

E

Effetto Hall; 53
elettrone di valenza; 45
energia fotovoltaica; 99

F

fotoconduttori; 55; 56
fotoresistori; 55
funzione d'onda; 13; 30; 31; 33; 34

G

gap; 18; 19
Gate; 82; 83; 85; 92; 93; 94
giunzione pn; 64

I

il modello atomico di Thomson; 6; 8
isolanti; 4; 19; 46

J

JFET; 82; 83; 84; 90; 91

L

L'energia Fotovoltaica; 99
lacune; 45; 46; 47; 48; 49; 66; 67
lunghezza d'onda critica; 56
Lyman; 24

M

Massa efficace; 51
METODO CASTING; 104
metodo Czochralsky; 61; 62
METODO EFG; 104
mobilità; 50
modello del gas elettronico; 50
MOSFET; 92; 94; 97

N

numeri quantici; 31; 37; 38
numero d'onda; 20; 23
numero quantico di spin m_s ; 33
numero quantico magnetico m_l ; 32
numero quantico principale n ; 31
numero quantico secondario o azimutale l ; 32

O

orbitali; 13; 14; 16; 27; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40

P

Paschen; 24
principio di indeterminazione di Heisenberg; 13
Principio di minima energia; 37
Principio di Pauli; 37
Purificazione chimica; 59
Purificazione fisica; 60

R

raffinazione a zone; 60
reattore a letto fluido; 59
reattore CVD; 59
Regola di Hund o della massima molteplicità; 37
reticolo cristallino; 17; 18; 44; 46; 47; 50; 64
Rutherford; 7; 9
ricombinazione; 49; 57; 67
Robert Mulliken; 36
Rydberg; 23

S

Schrödinger; 27; 30
semiconduttori; 4; 19; 43; 45; 46; 50
Source; 82; 83; 85; 92; 93; 94; 97
spettroscopia; 20; 22; 23
struttura monocristallina; 61

struttura policristallina; 61
substrato; 68; 71; 92; 93; 94

T

Tecnologia planare; 71
tempo di vita medio; 57
tensione di pinch-off; 88

Thomson; 6
transistor unipolari; 82

V

velocità di deriva; 50; 54