

COSA SONO I JFET OVVERO I TRANSISTORI AD EFFETTO DI CAMPO A GIUNZIONE

Di Vincenzo Iorio

Questa è una precisazione necessaria visto che esistono due tipi di transistori a effetto di campo. In questo articolo cominceremo ad effettuare la nostra conoscenza con il transistor ad effetto di campo a giunzione, chiamato anche **JFET** oppure soltanto **FET**. L'altro dispositivo chiamato **MOSFET** oppure a volte, soltanto **MOS**, è un transistor molto importante che il lettore ha già sentito nominare, ma che affronteremo in un articolo successivo.

Nel 1948 i ricercatori della Bell American Telephon & Telegraph Co: William Shockley, Thon Bardeen e Walter H. Brattain scoprirono il transistor bipolare. Questo dispositivo come è noto, funziona mediante la formazione di due giunzioni elettroniche attraverso le quali scorre la corrente. Quest'ultima viene controllata per mezzo di un'altra corrente che possiamo far circolare nel terminale di ingresso. Il transistor bipolare è infatti un dispositivo a tre terminali comandato in corrente. Inoltre il funzionamento del transistor è determinato dall'effetto combinato di due portatori di carica. Questo è il motivo per il quale tale dispositivo si chiama bipolare. Il transistor FET è invece un componente un tantino diverso dal suo predecessore. Innanzitutto il funzionamento è basato sul passaggio di corrente di un solo portatore di carica e poi si tratta di un dispositivo comandato in tensione.

Il nome FET significa **Field Effect Transistor**. Il FET sostanzialmente può essere pensato come una conduttanza realizzata a semiconduttore, controllata per mezzo di un campo elettrico applicato dall'esterno e perpendicolare al moto della corrente.

Prima di descrivere il funzionamento del FET occorre fare alcune precisazioni circa il funzionamento di una giunzione elettronica a semiconduttore. Non accenneremo che pochi concetti essenziali, rimandando eventualmente ad un successivo articolo una trattazione più particolareggiata di questa teoria. Per realizzare un diodo a semiconduttore è sufficiente porre a stretto contatto fra di loro due blocchi di semiconduttore drogati in modo complementare. Come sappiamo possiamo avere semiconduttori drogati tipo **N**, utilizzando del silicio monocristallino, a cui abbiamo sostituito alcuni dei suoi atomi del reticolo cristallino con atomi donatori. E possiamo avere semiconduttori drogati tipo **P**, sostituendo parte degli atomi di silicio con atomi accettori. Gli atomi donatori forniscono elettroni nel reticolo di silicio, gli atomi accettori invece assorbono elettroni producendo buche di potenziale o lacune.

Nel primo caso abbiamo conduzione elettrica attraverso passaggio di elettroni negativi, nel secondo caso il passaggio di corrente è ottenuto da lacune o cariche positive. Se poniamo in contatto il cristallo di silicio drogato

tipo N con quello drogato tipo P, otteniamo una giunzione. A questo punto si verifica un fenomeno abbastanza curioso: non appena i due cristalli vengono posti a contatto si ottiene uno svuotamento di cariche nella regione in prossimità della giunzione. Questo svuotamento è originato dalla normale attitudine delle cariche di annullarsi vicendevolmente se hanno una carica elettrica complementare. La figura n.1/b mostra appunto questo fatto.

Lo svuotamento di cariche ovviamente produce un potenziale che per il silicio è pari a circa **0.6 V**. Questo campo elettrico è chiamato barriera di potenziale.

Quello che a noi interessa maggiormente è il fenomeno che si genera quando poniamo la giunzione in un campo elettrico. Questo fatto può essere ottenuto collegando la giunzione a una batteria elettrica che fornisce un certo potenziale. Se il potenziale è applicato in modo tale da rendere positivo il blocchetto drogato tipo P, rispetto a quello N, avremo una riduzione della barriera di potenziale. Quest'ultimo caso produce come conseguenza il passaggio di corrente nel diodo ed è illustrato dalla figura 1/c. Se invece il potenziale è applicato in modo tale da rendere negativo il blocchetto drogato tipo P, rispetto a quello N, avremo un aumento della zona di svuotamento. Questo è il caso in cui il diodo è in interdizione e non passa corrente. La figura 1/d mostra questo fatto.

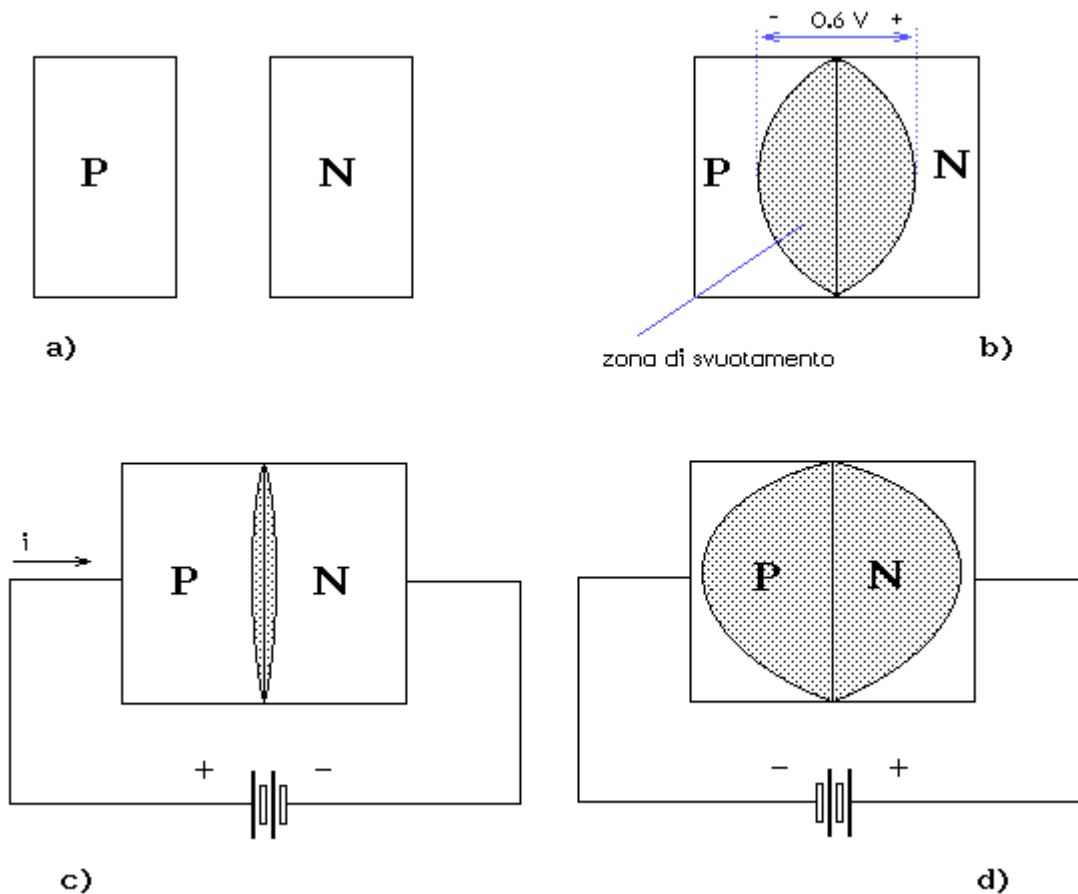


Fig. 1

Una zona di svuotamento è quindi un volume nel quale poiché non sussistono portatori di carica, la conducibilità elettrica in quello specifico volume è minima.

La nostra breve trattazione sulla giunzione è stata molto superficiale e molto semplificata, ma il nostro intento era quello di fare alcune precisazioni sulla barriera di potenziale. A questo punto possiamo descrivere il funzionamento del transistor FET con la sicurezza di essere più chiari circa la fisica del suo funzionamento.

COME FUNZIONA

Il transistor FET è un dispositivo che possiamo immaginare costituito da un blocchetto di materiale drogato opportunamente, per esempio tipo N, sui lati del quale sono poste due regioni drogate tipo P. La fig. n.2 mostra un esempio. Le regioni drogate tipo P sono connesse elettricamente fra loro e

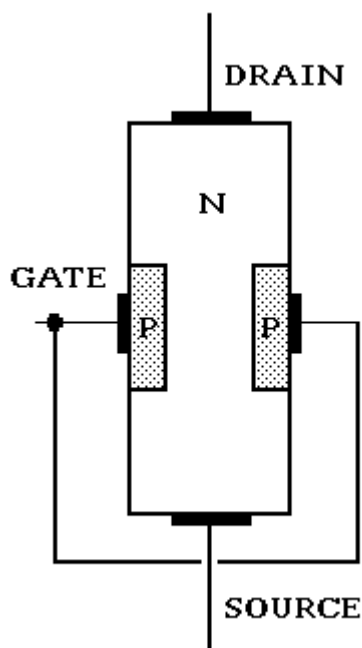


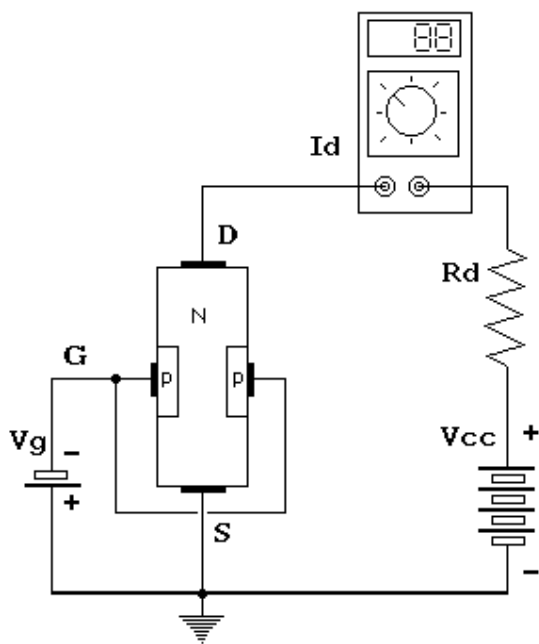
Fig. n.2

costituiranno l'ingresso di controllo del dispositivo chiamato **GATE**. Sul blocchetto drogato tipo N, sono praticate due connessioni chiamate rispettivamente **DRAIN** (pozzo) e **SOURCE** (sorgente). Questo tipo di FET si chiama FET a canale N. Ovviamente fatte le debite differenze, quello che diremo è valido anche per il FET a canale P.

Per quanto riguarda il funzionamento potremo riferirci alla figura n.3 che mostra una tipica connessione a source comune.

Questa figura illustra il modo corretto di inserire i generatori di tensione che permettono il funzionamento del FET. Il generatore di tensione V_{cc} è utilizzato per alimentare il circuito di uscita del FET. In questo circuito la corrente passa agevolmente poichè essa è

regolata soltanto dalla resistenza intrinseca del blocchetto tipo N e dalla resistenza di carico R_d . Questa corrente prende il nome di corrente di drain ed è misurata dal tester posto in serie al circuito di uscita. Il circuito di ingresso è invece costituito dal



generatore V_g connesso fra il terminale di gate e il source. In quest'ultimo circuito la corrente non può passare poichè il generatore V_g vede ai suoi capi un diodo a giunzione polarizzato inversamente. Questo fatto dipende ovviamente dalla disposizione del generatore V_g che pone negativa la regione P del gate, ma questo circuito è quello che il lettore deve realizzare se vuole ottenere un funzionamento perfetto del dispositivo. La giunzione di gate infatti è polarizzata inversamente quindi attorno alle regioni prossime ad essa si aprono ampie zone di svuotamento.

Fig. n.3

Queste aree essendo prive di portatori di carica elettrica sono considerate a tutti gli effetti zone ad altissima resistività. La figura n.4 mostra come per diversi valori della tensione del generatore V_g possiamo avere varie ampiezze dell'area di svuotamento o barriera di potenziale.

Questo strozzamento del canale di conduzione influenza la corrente che attraversa il dispositivo realizzando una sorta di controllo di conducibilità. La figura 4/a mostra infatti un generico FET al quale abbiamo applicato una tensione di 2 volt negativi al gate; in questo caso, supposto costante una certa tensione V_{CC} , all'interno del canale passano per esempio **29 mA**. La figura 4/b mostra invece quello che accade se portiamo la tensione del generatore a 4 volt, la corrente di drain in questo caso scende al valore di **15 mA**. Questi valori sono indicati solo per fare un esempio concreto come se stessi realmente misurando il dispositivo in un esperimento di laboratorio.

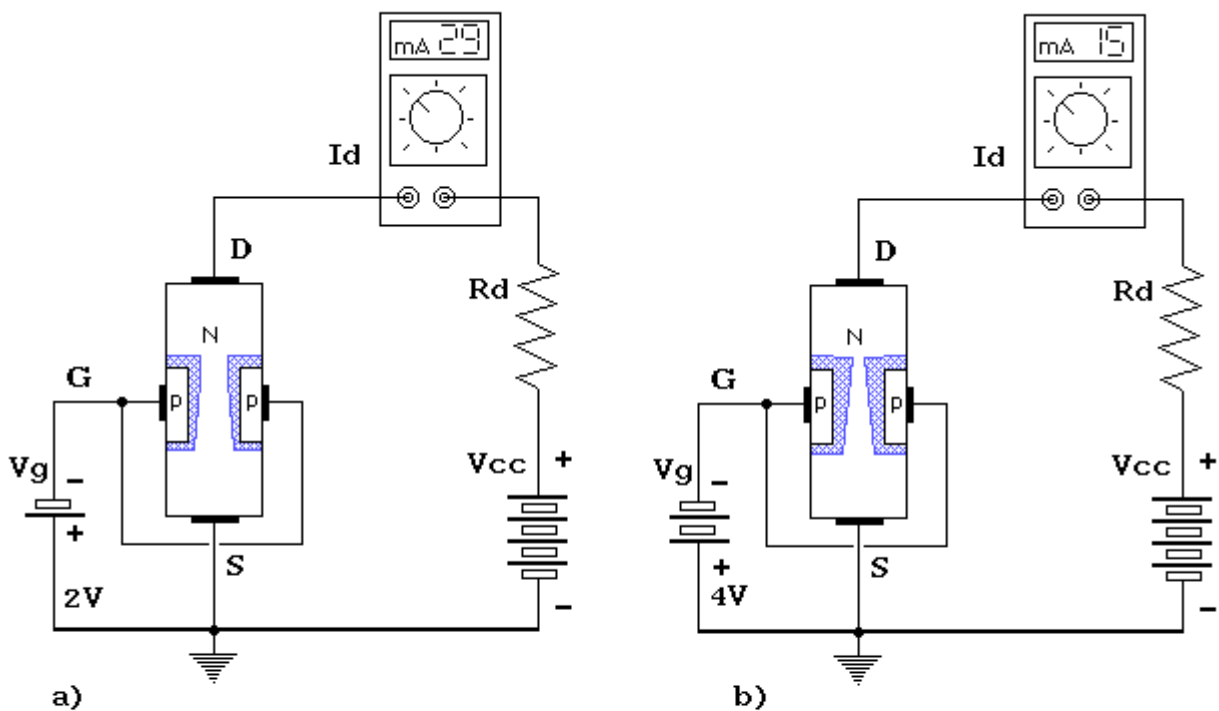


Fig 4

L'asimmetria della zona di svuotamento pronunciata verso l'area della regione di drain è una naturale conseguenza del campo elettrico distribuito lungo il blocchetto N, causata dal valore del generatore V_{cc} .

Supponiamo di avere un tubo di gomma all'interno del quale scorre dell'acqua, potremo avere lo stesso effetto regolatore del flusso di liquido se in una regione del tubo operiamo un restringimento della sua sezione, per esempio stringendolo nel palmo di una mano. Se il valore della portata dell'acqua che scorre nel tubo lo paragoniamo al valore della corrente di drain del circuito che abbiamo visto, possiamo per analogia immaginare il valore della tensione V_g come la forza esercitata dalla mano che stringe il tubo di gomma. In un modo simile funziona il nostro transistor FET. Variando la tensione V_g applicata all'ingresso e come se stringessimo un tubo di gomma all'interno del quale scorre un flusso di acqua (la nostra corrente di drain).

In parole povere, per mezzo di questo effetto abbiamo un dispositivo in grado di controllare una corrente, che può essere anche di valore piuttosto elevato tramite una tensione in ingresso di pochissimi volt. L'osservazione più importante è che questo controllo non richiede molta energia. Infatti la giunzione di ingresso gate/source, funzionando da diodo inversamente polarizzato non richiede passaggio di corrente. Da un punto di vista strettamente pratico possiamo dire che questa corrente è praticamente zero.

Se pensiamo di collegare al posto del generatore V_g all'ingresso del circuito illustrato un segnale, proveniente da un dispositivo qualunque, il nostro circuito gli offrirà una resistenza elevatissima.

Quest'ultima osservazione ci porta alla mente un articolo già apparso su questo sito che riguarda i tubi elettronici ([clicca qui per aprirlo](#)). Come il lettore ricorderà, nell'articolo, abbiamo esaminato il funzionamento dei tubi elettronici a vuoto e abbiamo detto che i tubi termoionici sono controllati in tensione e hanno un'impedenza d'ingresso molto elevata. Ci sono molte analogie fra i transistori FET e i tubi termoionici. Anche i tubi termoionici come i FET funzionano mediante il passaggio di un solo portatore di carica. Addirittura la maggior parte delle formule matematiche che riguardano il funzionamento o la progettazione di transistori FET usano gli stessi simboli e grandezze fisiche utilizzate normalmente per i tubi elettronici.

La figura n.5 seguente mostra il simbolo elettronico del transistore FET a canale N e a canale P, confrontato con i dispositivi elettronici che sono stati i suoi precursori.

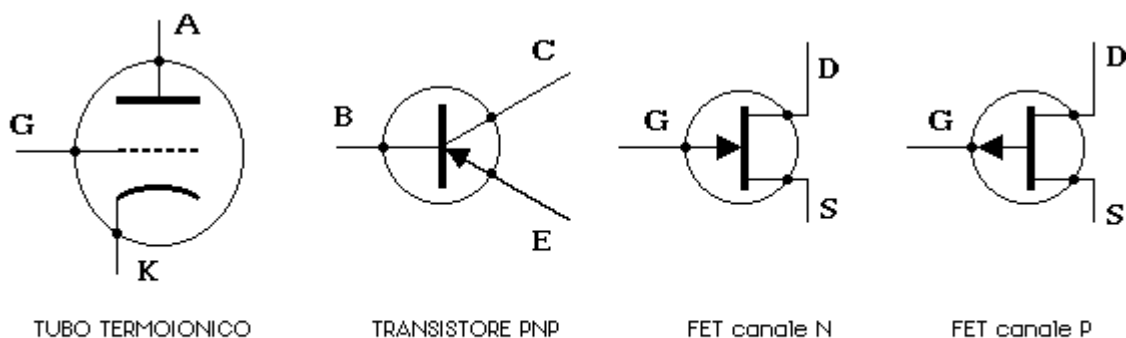


Fig n. 5

Le differenze importanti che ci permettono di inquadrare i dispositivi elencati sono queste: i tubi elettronici e i FET sono dispositivi unipolari mentre i transistori funzionano in modo bipolare. I tubi elettronici e i FET sono dispositivi comandati in tensione con un' impedenza d'ingresso molto elevata; i transistori bipolari invece sono comandati in corrente ed hanno un impedenza d'ingresso molto più bassa. Intanto c'è da considerare che i tubi elettronici rispetto ai transistori FET utilizzano tensioni di lavoro molto più elevate e per di più hanno bisogno della tensione di alimentazione del filamento riscaldatore.

CARATTERISTICHE E APPLICAZIONI

Per usare un transistore FET a canale N è sufficiente alimentarlo opportunamente fornendogli una tensione positiva al drain e polarizzandolo sulla giunzione di gate in modo che questa risulti negativa rispetto al source.

Poichè la conduzione nel circuito di drain risulta dipendente dal valore di tensione che applichiamo al gate, possiamo ottenere una caratteristica che lega la corrente di drain in funzione della tensione presente al gate ottenendo così una funzione chiamata in elettronica **caratteristica mutua**. Questa funzione è molto importante perchè ci permette di individuare il punto di lavoro del componente e di estrarre alcune peculiarità tipiche dei FET.

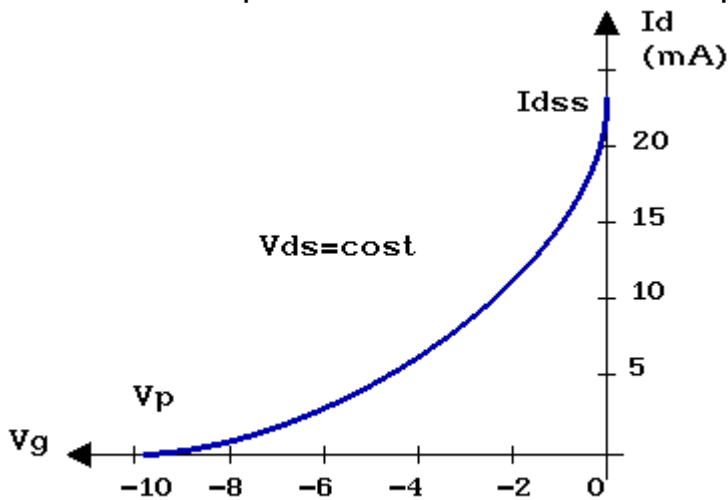


Fig 6

Come possiamo osservare dalla figura n.6, la caratteristica mutua esprime proprio il comportamento del componente che abbiamo descritto. La caratteristica è stata ricavata per una certa tensione applicata a V_{ds} . Valori molto alti di tensione di gate riducono fortemente la corrente di drain. Valori bassi di questa tensione portano il

dispositivo a lavorare a livelli più elevati di corrente di drain. Quando la corrente di drain assume il suo valore più alto per V_g uguale a zero, questo valore viene chiamato **I_{dss}** . Il valore di tensione di gate invece che azzerava completamente la corrente di drain viene chiamato **tensione di pinch-off** o semplicemente **V_p** . Questi valori sono comunemente citati dai costruttori che li riportano sui data-sheet relativi ai FET posti in commercio.

Possiamo ricavare anche altri tipi di caratteristiche da un transistor FET; esse sono le caratteristiche di uscita, chiamate anche **caratteristiche di drain**. Queste caratteristiche si ottengono osservando il comportamento della corrente di drain variando linearmente la tensione applicata al dispositivo fra drain e source (V_{ds}). Le caratteristiche di uscita o di drain sono più di una, è questo è evidente poichè vengono calcolate ognuna per un determinato valore della tensione di gate V_{gs} . La figura n.7 mostra un esempio di una famiglia di caratteristiche di uscita.

Anche il transistor bipolare ha una famiglia di caratteristiche di uscita quindi similmente ad esso, noi possiamo realizzare con il transistor FET tutti quei circuiti elettronici che utilizzavano precedentemente il transistor bipolare.

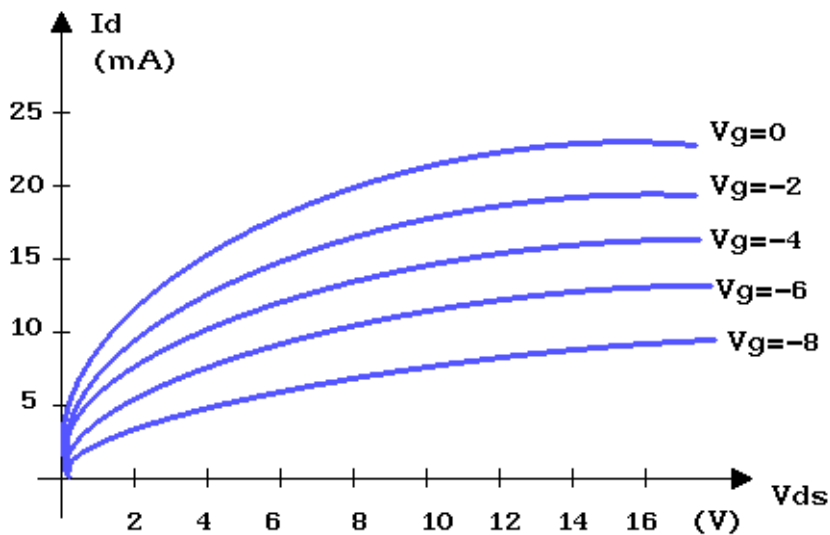


Fig 7

Per ottenere un semplice stadio amplificatore è sufficiente inserire una resistenza nel circuito di uscita di appropriato valore chiamata **resistenza di carico**. In questo modo le variazioni di corrente di drain prodotte dalla variazioni del segnale V_g applicato in gate si trasformano in variazioni di tensioni.

Queste variazioni di tensione le possiamo raccogliere inserendo un condensatore di disaccoppiamento sul drain. La figura 8, mostra appunto un circuito che utilizza un transistor FET in una configurazione chiamata a source comune. La resistenza R_d è la resistenza di carico, il condensatore C_2 è utilizzato per disaccoppiare il

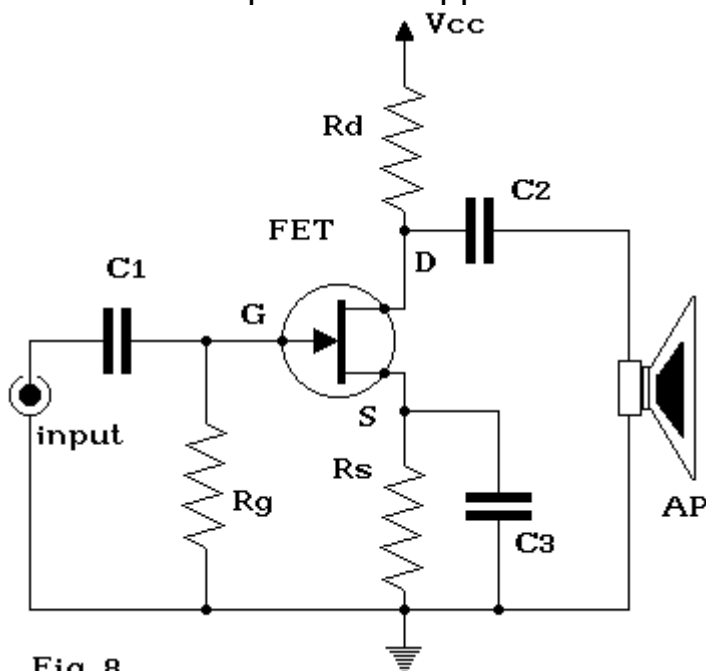


Fig 8

segnale e mandarlo a un piccolo altoparlante.

Il condensatore C_1 ha la funzione di disaccoppiare un eventuale trasduttore microfonico di ingresso. Il resistore R_s e il resistore R_g sono utilizzati per polarizzare in modo automatico il gate del FET, più il valore di R_s è grande e più elevata è la tensione negativa applicata al gate. Il resistore R_g ha tipicamente un valore molto elevato per non degradare l'impedenza d'ingresso dello

stadio. Per evitare che il resistore R_s influenzi il valore complessivo delle resistenze inserite nel circuito di uscita, il condensatore C_3 viene inserito in parallelo a R_s in modo da cortocircuitare questa resistenza per quanto riguarda il segnale.

Tuttavia il circuito presentato, non è il solo schema possibile che possiamo realizzare con un transistor FET, per quanto riguarda uno stadio amplificatore, esistono in totale tre tipi di semplici connessioni che utilizzano un FET.

A parte quest'ultimo circuito che come abbiamo detto è chiamato a **source comune**, esiste: il circuito a **drain comune** e il circuito a **gate comune**.

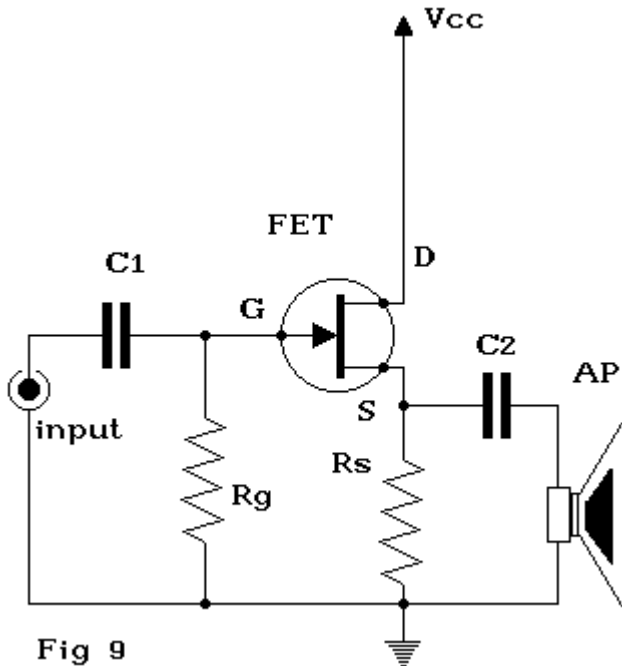


Fig 9

Il circuito a drain comune illustrato nella figura n.9 ha come peculiarità il punto di connessione del segnale di uscita ricavato sulla resistenza R_s proprio sul terminale di source. Questo tipo di circuito presenta una maggiore impedenza di ingresso rispetto a quello a source comune, un'amplificazione di tensione unitaria, un'impedenza di uscita bassa e una buona amplificazione di corrente. Mentre il circuito precedente a source comune, inverte la fase del segnale amplificato di 180° , questo circuito non modifica la fase del segnale.

La resistenza R_d è ovviamente omessa per garantire il criterio di terminale comune di drain. Per ragioni che riguardano il circuito equivalente in frequenza del dispositivo, (tematiche tra l'altro affrontate ampiamente nei programmi didattici di alcune scuole tecniche) il terminale comune può essere connesso indistintamente sia sul positivo dell'alimentazione che sul negativo.

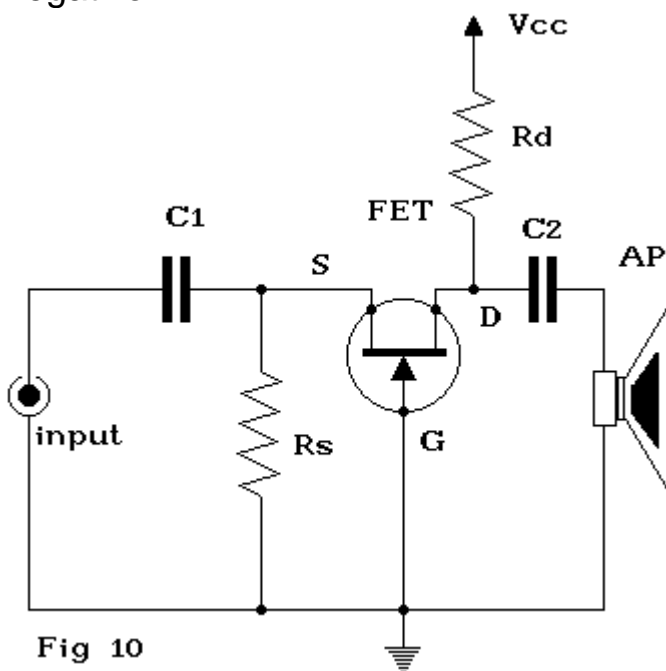


Fig 10

Il circuito a gate comune è invece illustrato nella figura n.10. La disposizione circuitale del FET prevede un collegamento con il gate a massa. In questo caso il segnale di ingresso è applicato tramite il condensatore di accoppiamento C_1 direttamente sul terminale di source. con questa disposizione ovviamente la fase del segnale in uscita non sarà modificata. Il circuito presenta un'impedenza di ingresso bassa e un'impedenza di uscita più alta di quella del circuito a source comune.

Il FET a gate comune viene normalmente utilizzato in circuiti più complessi chiamati **CASCADE** che lavorano a frequenze molto elevate.

Come è facile notare dalla descrizione che abbiamo fatto, lo stadio amplificatore a source comune ha caratteristiche intermedie fra quelle possedute da i due ultimi circuiti. La tabella n.1 mostra in sintesi le principali differenziazioni delle varie inserzioni circuitali.

La tabella è stata realizzata prendendo come riferimento la connessione a source comune.

CIRCUITI BASE DEL FET				
	Impedenza di ingresso	impedenza di uscita	amplificazione di tensione	amplificazione di corrente
source comune	media	media	alta	media
drain comune	alta	bassa	unitaria	alta
gate comune	bassa	alta	come per il source comune	unitaria

tab. n.1

I vantaggi presentati dall'impiego del transistor FET sono numerosi. Il transistor bipolare (bjt) presenta indubbiamente un' impedenza di ingresso molto più bassa di quella dei FET e questa caratteristica in elettronica è molto richiesta se adoperiamo il componente come stadio di ingresso di un dispositivo. Alcuni circuiti con il FET sono leggermente più semplici grazie alle sue peculiarità. Il rumore elettronico prodotto da questo dispositivo è più basso di quello prodotto dai transistori bjt. Inoltre per un certo tratto iniziale le sue caratteristiche di drain mostrano una certa linearità. Quest'ultima ragione li fa preferire rispetto ai transistori bipolari, in quanto si possono realizzare con essi interessanti circuiti a resistività controllata per mezzo di una tensione applicata all'ingresso.

Questo nostro articolo, realizzato su base prevalentemente introduttiva sull'argomento vuole essere uno stimolo per i lettori che ci seguono su questo sito e anche, perchè no, per tutti quegli insegnanti o professionisti che ci stanno vicini.

Vincenzo Iorio