

1 Test su dispositivi a semiconduttore

Le misure generalmente compiute su dispositivi (più o meno complessi) a semiconduttore possono essere classificate come segue:

- **Test in corrente continua:**

sono impiegati per verificare che i dispositivi sotto misura assorbano le correnti previste dai terminali d'ingresso o dalle alimentazioni, e/o che erogino le correnti previste dai terminali d'uscita. Gli strumenti tipicamente utilizzati per questo genere di misure sono alimentatori, voltmetri e amperometri; più avanti verranno descritte le SMU, dispositivi che integrano tutte queste funzioni.

- **Test in corrente alternata:**

servono a verificare che i dispositivi abbiano le previste caratteristiche in AC: esempi di tali caratteristiche sono la risposta in frequenza, l'ampiezza di banda, il rumore, la distorsione, ecc. Le funzioni tipiche degli strumenti utilizzati per questo tipo di test sono quelle dei generatori di forme d'onda (sinusoidali o meno) e di misuratori in corrente alternata.

- **Test nel dominio del tempo:**

sono misure di ritardo di propagazione, tempi di salita e discesa, ed altre, utili per esempio per verificare che il dispositivo si comporti correttamente quando interfacciato con altri. Le funzioni tipiche sono quelle dei misuratori di (intervalli di) tempo - come per esempio gli strumenti a contatore - e i digitalizzatori ad alta frequenza.

Tutti questi test interessano generalmente ogni fase del processo produttivo di dispositivi e sistemi elettronici: controllo di processo in fonderia, collaudo dei componenti (diodi, transistor, ecc., fino ai dispositivi più complessi, come le memorie e i microprocessori), collaudo di apparecchiature, test di affidabilità, *life test* ...

Nel seguito verranno presi in considerazione due tra i più diffusi strumenti di test di dispositivi a semiconduttore: il Caratteristigrafo e le Source Measurement Unit (SMU). Entrambi consentono di effettuare test in corrente continua, ma le SMU offrono limitate possibilità di operare anche in corrente alternata.

Per il caratteristigrafo v.:

E.A. Bozzoni, *Misure Elettroniche*, p. seconda, cap. 23, SEU, Pisa (2000)

1.2 Analizzatori di parametri

Per la caratterizzazione di componenti a semiconduttori è possibile, oggiogiorno, effettuare misure (generalmente solo in corrente continua) su dispositivi anche molto complessi, ma anche su materiali e semplici strutture, in maniera relativamente semplice e molto affidabile, grazie a strumenti programmabili, quali gli “Analizzatori di Parametri” (*Parameter Analyzer*), il cui funzionamento è basato sull’impiego delle *Source-Measurement Unit* (S.M.U.).

Una S.M.U. è un dispositivo in grado di fornire una tensione, misurando la corrente erogata (a un carico) o, alternativamente, di fornire corrente, misurando la tensione prodotta sul carico. Nel primo caso si parla di funzionamento nella modalità *V force-I measure*, mentre nel secondo il funzionamento è di tipo *I force-V measure*. Si tratta di dispositivi completamente programmabili (per definire la modalità di funzionamento, ma anche i valori di tensione o corrente erogati e il modo in cui essi devono eventualmente variare nel tempo) utilizzabili come unità indipendenti o, in numero opportuno e opportunamente programmate e sincronizzate, all’interno di uno strumento più complesso come appunto un Analizzatore di Parametri.

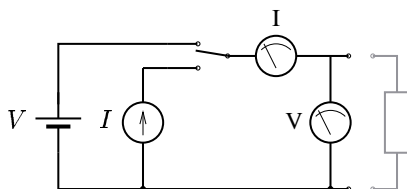


Figura 7 - Schematizzazione essenziale di una S.M.U..

Una possibile schematizzazione per una S.M.U. è riportata in Figura 7. In essa, il commutatore evidenzia la possibilità di funzionamento in una delle due modalità suddette, l’Ampereometro consente la misura della corrente (quando è attivo il generatore di tensione), mentre il Voltmetro misura la tensione che il generatore di corrente produce sul carico. Entrambi i generatori sono programmabili e possono fornire tensione (o corrente) costante, oppure variabile nel tempo con andamento a rampa, a gradinata o secondo sequenze di valori definite dall’utilizzatore.

La misura della corrente (o della tensione) fornite consente anche di limitare il valore dell’una o dell’altra, proteggendo il dispositivo sotto misura da possibili danni dovuti a eccessiva sollecitazione.

Le S.M.U. possono generalmente fornire o assorbire potenza; si parla pertanto di *funzionamento su quattro quadranti*. Il punto rappresentativo del funzionamento della S.M.U., riportato su un diagramma tensione-corrente (una volta definito il verso positivo per le tensioni e le correnti, v. Figura 8) può infatti essere caratterizzato da segno concorde di tensione e corrente (e in questo caso la S.M.U. dissipa potenza) o discorde (la potenza è allora erogata dalla S.M.U.).

Un impiego tipico per una singola S.M.U. è quello del rilievo della caratteristica corrente-tensione di un bipolo (Figura 10(a)). In questo caso la S.M.U. può essere programmata per

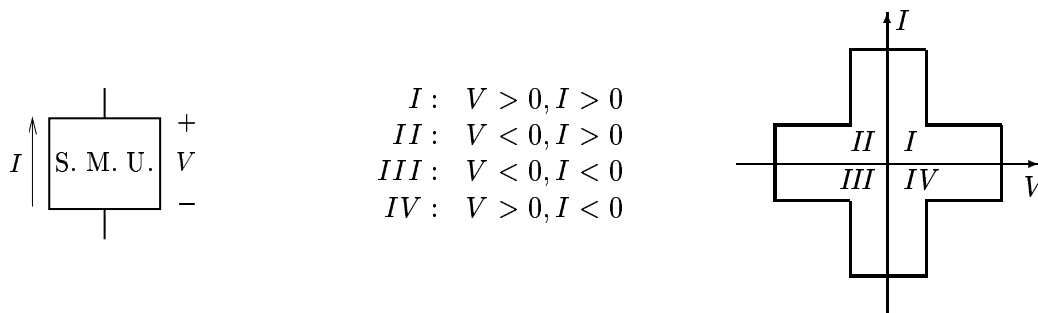


Figura 8 - Regioni di funzionamento di una S.M.U.: in accordo alle definizioni del verso di corrente e tensione, nelle regioni I e III il dispositivo si comporta da generatore, mentre nelle regioni II e IV si comporta da carico.



Figura 9 - Altri esempi di regioni di funzionamento per una S.M.U. (da manuali e cataloghi di case costruttrici).

fornire tensione variabile tra V_{MIN} e V_{MAX} con passo ΔV , misurare la corrente in corrispondenza di ciascun valore di tensione impostata e arrestare l'incremento di tensione nel caso in cui la corrente assorbita da bipolo superi eventualmente un determinato valore I_{MAX} ; in fase di programmazione è possibile inoltre definire la velocità di variazione della tensione durante la scansione.



Figura 10 - Rilievo (a) della caratteristica $I-V$ di un diodo per mezzo di una S.M.U. e (b) delle caratteristiche d'uscita di un transistor bipolare mediante 2 S.M.U..

Uno schema elettrico ragionevolmente realistico per una S.M.U. in modalità V_{force} è riportato in Figura 11. Nel circuito rappresentato A_1 ed A_2 sono amplificatori operazionali, mentre

A_d è un amplificatore da strumentazione. Poiché il percorso comprendente A_1 , la resistenza R e il buffer ottenuto mediante A_2 è un anello di reazione negativa, grazie all'elevatissimo guadagno di A_1 , all'equilibrio, la tensione presente sull'ingresso non invertente di A_1 eguaglia quella sull'ingresso invertente. Poiché quest'ultima è la tensione sul dispositivo sotto misura (D.U.T., *Device Under Test*) riportata "indietro" mediante il buffer, allora imponendo sull'ingresso non invertente di A_1 una determinata tensione V , si ottiene l'effetto di polarizzare il D.U.T. proprio a tensione V . Per ottenere la tensione richiesta si opera mediante il convertitore D-A, applicando in ingresso a questo la codifica binaria (V_{force}) della tensione V .

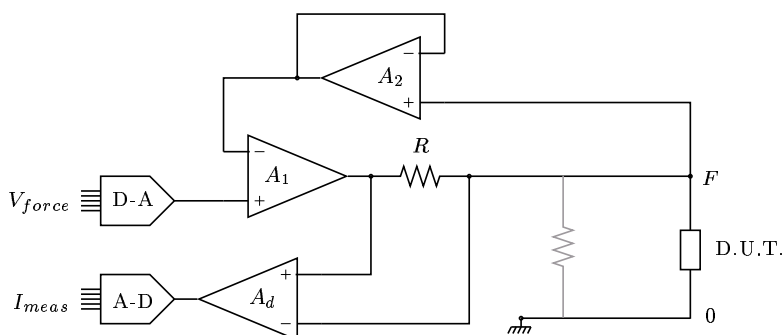


Figura 11 - Circuito equivalente per una S.M.U. in modalità V_{force} - $I_{measure}$; la resistenza in grigio rappresenta l'effetto delle perdite attraverso l'isolante del cavo di collegamento del campione allo strumento.

Considerando, come è lecito fare, che né il buffer né l'amplificatore da strumentazione assorbono corrente, la resistenza R è disposta in serie al campione sotto misura ed è pertanto percorsa dalla stessa corrente che scorre in questo. La tensione su R , opportunamente amplificata, determina, all'uscita del convertitore A-D, una codifica della corrente nel carico. Pertanto la resistenza R , l'amplificatore da strumentazione e il convertitore A-D permettono la misura della corrente erogata dalla S.M.U. ($I_{measure}$).

Nel caso in cui il campione assorbe una corrente molto esigua (come avviene, per esempio, con un materiale isolante, o con una giunzione polarizzata inversamente, o con una struttura MOS), può essere non più trascurabile (rispetto a quella che scorre nel campione) la corrente di perdita attraverso l'isolante del cavo di collegamento del campione allo strumento. Tale corrente, che scorre nella resistenza R ma non nel dispositivo sotto misura, viene pertanto erroneamente misurata. Per ovviare a tutto ciò è utile impiegare un elettrodo di *guardia* (G in Figura 12), sul quale è riportata (mediante il buffer realizzato con A_3) la tensione presente sul carico; si osservi che il terminale di guardia è collocato tra il terminale (F) con il quale si "forza" la tensione sul carico e il terminale (0) di riferimento.

In queste condizioni la resistenza di perdita tra il conduttore centrale e l'elettrodo di guardia,

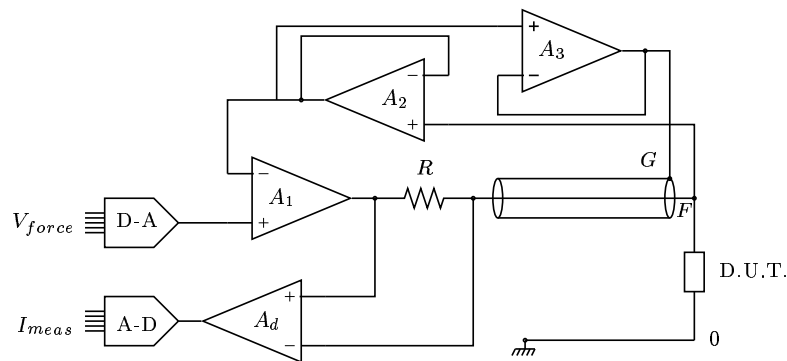


Figura 12 - Circuito equivalente per una S.M.U. in modalità *V force-I measure*, con elettrodo di guardia per ridurre l'errore dovuto alle correnti di perdita.

sottoposta a differenza di potenziale pressoché nulla, non assorbe corrente, mentre quella tra elettrodo di guardia e terminale di riferimento (sulla quale invece insiste la stessa tensione applicata sul carico) è percorsa da una corrente erogata dal buffer (A_3), che pertanto (non interessando la resistenza R) non viene misurata.

In Figura 13 è invece riportato lo schema equivalente di una S.M.U. in configurazione *I force-V measure*.

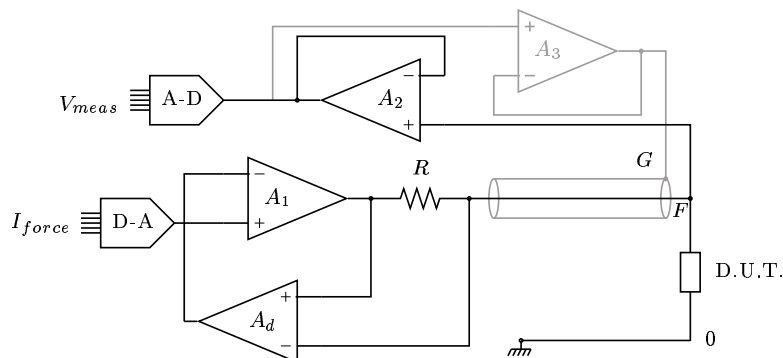


Figura 13 - Circuito equivalente per una S.M.U. in modalità *I force-V measure*, con elettrodo di guardia per ridurre l'errore dovuto alle correnti di perdita.

Come si vede il circuito è costituito dagli stessi blocchi che compongono quello di Figura 12, ma diversamente collegati fra loro. In questo caso la corrente desiderata viene imposta al carico mediante un'opportuna codifica all'ingresso del convertitore D-A; l'anello di retroazione negativa $A_1 - R - A_d$, caratterizzato da guadagno molto elevato per la presenza dell'amplificatore operazionale A_1 , assicura l'uguaglianza delle tensioni sugli ingressi dello stesso A_1 . Pertanto

il sistema all'equilibrio lavora con una tensione sull'ingresso invertente di A_1 (proporzionale alla corrente nel carico) pari a quella imposta dall'uscita del convertitore D-A. La misura della tensione sul carico avviene mediante il buffer (A_2) che porta la tensione stessa in ingresso al convertitore A-D, sulla cui uscita si otterrà la relativa codifica.

Anche in questo caso gli effetti delle correnti di perdita attraverso l'isolante del cavo possono essere ridotti utilizzando un elettrodo di guardia sul quale è riportata (mediante i buffer realizzati con A_2 e A_3) la tensione sul carico.

Il passaggio da una configurazione all'altra avviene, in fase di programmazione del dispositivo, ad opera di opportuni commutatori elettronici. La possibilità di lavorare con più valori di R e di A_d consente di modificare la portata nella misura della corrente (I *measure*) o l'intervallo di valori di corrente selezionabili (I *force*).

I moderni analizzatori di parametri sono strumenti che alloggiavano al loro interno un numero di S.M.U. generalmente compreso tra 2 e 8 (tutte configurabili secondo quanto già esposto) e dispongono di una opportuna interfaccia che permette all'utente di programmarle in maniera agevole, consentendo inoltre la visualizzazione su un display (almeno in forma di diagramma) delle caratteristiche misurate. La presenza di un adeguato pacchetto software permette inoltre la memorizzazione numerica dei risultati delle misure su tabelle, anche nei formati dei più diffusi fogli di calcolo e alcune forme di elaborazione dei dati già "a bordo" dello strumento: un esempio tipico è il calcolo della resistenza differenziale di un bipolo a partire dalla sua caratteristica I - V .

Essi sono inoltre generalmente dotati di dispositivi di memoria interni (*hard disk*) e di porte di comunicazione con l'esterno (RS-232, IEEE 488, USB, ...), nonché di lettore di *floppy-disk* per la memorizzazione delle misure effettuate e per la loro "esportazione". Le configurazioni più frequentemente utilizzate possono anche essere memorizzate e richiamate all'occorrenza: in questo modo si evita di dover ridefinire complessi *set-up* di misura ogni volta che servono, evitando perdite di tempo e possibilità di errori.

La disponibilità di più S.M.U. consente la caratterizzazione di dispositivi più complessi del semplice bipolo. Ad esempio, lavorando con 2 S.M.U. è possibile ricavare le caratteristiche d'uscita di un transistor bipolare, secondo lo schema riportato in Figura 10(b). La S.M.U.1 è programmata in modalità I *force*, in modo da imporre una corrente (la corrente di base) che varia secondo una gradinata da un determinato valore minimo $I_{B,MIN}$ a un valore massimo $I_{B,max}$ in un certo numero n di passi (o con un determinato incremento ΔI_B); l'eventuale misura della tensione ai terminali della S.M.U. permette anche di ricavare la relazione tra I_B e V_{BE} per diversi valori di V_{CE} (cioè la caratteristiche d'ingresso nella configurazione a emettitore comune). La S.M.U.2 viene invece programmata (V *force*- I *measure*) per scandire un determinato intervallo di valori di V_{CE} , misurando la corrente di collettore I_C .

Per la misura della caratteristiche d'uscita di un MOSFET, basta invece configurare anche la S.M.U.1 in modalità V *force* e programmarla in modo che generi una gradinata di valori di tensione (V_{GS}).

All'aumentare della complessità del dispositivo da caratterizzare aumenta in generale il numero di S.M.U. necessarie. Gli analizzatori di parametri hanno generalmente struttura modulare, che consente di acquistarli in configurazione minima (cioè con due sole S.M.U.) e di espanderli, al crescere delle necessità, con l'aggiunta di altre S.M.U. negli *slot* disponibili.

Le possibilità di programmare le sollecitazioni in tensione o corrente per i vari tipi di test sono molto ampie (Figura 14):

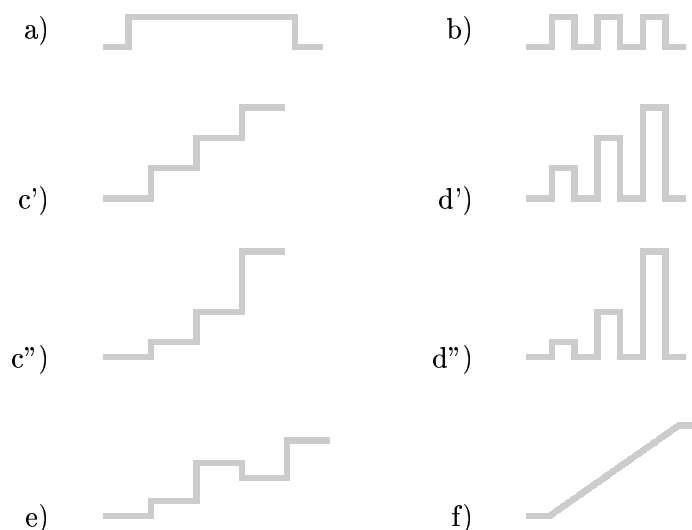


Figura 14 - Esempi di andamento di tensione/corrente nei misuratori di parametri basati su S.M.U..

- a) condizioni di polarizzazione costanti per un determinato periodo di tempo, durante il quale possono essere effettuate diverse misure, opportunamente distanziate nel tempo: questo modo di operare è tipico dell'analisi dello *stress* in materiali isolanti (o in strutture MOS);
- b) successione di impulsi di tensione/corrente con la possibilità di definire l'ampiezza e la durata degli impulsi e la distanza temporale tra ciascuno e il successivo;
- c) gradinate di tensione/corrente con successione lineare (c', passo costante) o logaritmica (c'') dei valori forniti;
- d) gradinate di impulsi di tensione/corrente con andamento lineare (d') o logaritmico (d'');
- e) successione di valori di tensione/corrente definite arbitrariamente dall'utente.

- f) rampa lineare (dal momento che la S.M.U. viene pilotata mediante un convertitore D-A, si tratta in realtà di una gradinata in cui il passo tra un livello e il successivo corrisponde alla massima risoluzione possibile).

Alcuni strumenti consentono inoltre di pilotare le S.M.U. in modo che esse forniscano tensione o corrente “simulando” un andamento sinusoidale (in realtà si tratta di successioni di valori che approssimano un andamento sinusoidale, ovviamente in modo discreto). Questo, unito alla possibilità di acquisire nel tempo le grandezze (tensione o corrente) misurate, permette limitate capacità di analisi in frequenza, generalmente limitate al di sotto del kilohertz.

La risoluzione in tensione può arrivare fino al microvolt (in programmazione (*source*) e in misura, quella in corrente fino al picoampere (ma utilizzando dei preamplificatori essa può essere estesa fino alle decine di femtoampere). Le massime potenze erogabili (o dissipabili) negli strumenti in commercio arrivano al centinaio di Watt.

Esistono in commercio S.M.U. realizzate in forma di circuito integrato; un esempio di queste è il dispositivo AD53508 di Analog Devices.

L'accuratezza delle misure ottenibili con le S.M.U. e con i sistemi di misura basati su di esse, unita alla semplicità di programmazione e utilizzo, ne fanno uno strumento estremamente diffuso in tutti gli ambienti in cui è necessario caratterizzare dispositivi, materiali, strutture, sia a scopo di ricerca, sia nelle applicazioni industriali come il collaudo, il controllo di qualità, il controllo di processo.