Laboratorio di Fisica II

Misure su rivelatori a silicio

1 Scopo dell'esperimento

Lo scopo dell'esperimento è di misurare le caratteristiche di un rivelatore a silicio a microstrip che sono determinanti per il suo funzionamento (e anche per la scelta del preamplificatore).

In particolare si vuole misurare: (i) la caratteristica **corrente–tensione** in polarizzazione inversa (una delle sorgenti di rumore è data dalla fluttuazione della corrente continua), (ii) la caratteristica **capacità–tensione**, sempre in polarizzazione inversa, dalla quale si ricavano (a) il valore della tensione di svuotamento del rivelatore, (b) il valore della capacità che entra nel calcolo del rumore in carica riferito all'ingresso (ENC).

Poichè si tratta di misurare correnti e capacità molto piccole, bisogna usare strumenti molto sensibili e particolari accorgimenti: uso di gabbie di Faraday, cavi schermati, sottrazione delle capacità parassite a circuito aperto e a circuito chiuso. Queste tecniche di misura sono di uso corrente per la caratterizzazione di dispositivi a semiconduttore in generale.

2 Materiale a disposizione

- rivelatori a silicio a microstrip:
  - tipo "design W" a faccia singola, 16 strips, 5 cm x 5 cm
  - tipo "design W" a doppia faccia, 16+16 strips, 5 cm x 5 cm
- Sorgente/Misuratore di corrente/tensione (SMU) Keithley mod. 236 (oppure mod. 237)
- Misuratore LCR di precisione HP mod. 4284A
- Apparecchio di prova (test fixture) per polarizzazione esterna HP mod. 16065A
- cavi di collegamento tra Keithley 236/237 e utilizzatore (ovvero, direttamente con il dispositivo in misura oppure con la *test fixture* HP 16065A):
  - 2 cavi triassiali 7078–TRX–10
  - 1 cavo triassiale con morsetti a coccodrillo 237–ALG–2

  - 2 adattatori 237–BNC–TRX

- piastre per montare i rivelatori all'interno dell'HP 16065A (collegano insieme tutte le strip dallo stesso lato di un rivelatore)

- sistema per aumentare la temperatura all'interno dell'HP 16065A, costituito da resistenza di potenza, sensore, regolatore di temperatura

- sonda di temperatura (Fluke 80 TK) collegata ad un multimetro digitale

- *Misuratore LCR portatile mod. B131 (solo per confronto di precisione con il misuratore HP 4284A)*

3 Parte 1: misura della caratteristica I–V a diverse temperature

Per questa misura si usano la SMU **Keithley 236** (oppure 237) nella configurazione sorgente di tensione (e misura di corrente) e l'apparecchio di prova (test fixture) **HP 16065A**, che viene qui utilizzato principalmente come gabbia di Faraday e come riparo dalla luce.

Per familiarizzarsi con il Keithley 236/237 conviene fare alcune prove su una resistenza di alcuni MΩ collegata alla SMU tramite il cavo 237–ALG–2 con morsetti a coccodrillo. Il cavo va collegato provvisoriamente all'uscita OUTPUT HI sul pannello posteriore del Keithley, al posto del cavo 7078-TRX-10: v. allegato 1.

Tenere presenti le pagine da 1–13 a 1–17 del manuale Keithley 236/237/238 per la descrizione del pannello frontale e posteriore della SMU. Impostare una misura di corrente in modo DC (fornendo ad es. 10 V): si può seguire l'esempio alle pagine 1–22 e 1–23 del manuale, facendo gli opportuni cambiamenti dato che si vuole fornire V invece di I. Fare riferimento per dettagli alle pagine da 2–33 a 2–54 (Operating Fundamentals (DC Operation)) del manuale.

Dopo le prove con la resistenza, ristabilire la connessione tra l'uscita OUTPUT HI sul pannello posteriore del Keithley e l'apparecchio di prova 16065A mediante il cavo 7078-TRX-10. Inserire nel 16065A un **rivelatore a doppia faccia** montato sulla piastra corrispondente, avendo cura di collegare il backplane (substrato di tipo n) al terminale HIGH e il lato p al terminale LOW dell'apparecchio di prova. In questo modo una tensione *POSITIVA* impostata sulla SMU corrisponde ad una polarizzazione *INVERSA* del rivelatore: quindi andranno impostate esclusivamente tensioni positive. Per evitare infiltrazioni di luce che potrebbero alterare la misura di corrente, è opportuno chiudere le fessure con nastro adesivo nero.

Per decidere le modalità di misura ottimali, conviene impostare una tensione di 10 V (in modo DC) e fare alcune serie di misure della corrente del rivelatore, variando tra una serie e l'altra il tempo di integrazione (FAST -

MEDIUM - LINE) o il numero di letture che vengono mediate. È opportuno confrontare la fluttuazione osservata tra misure della stessa serie (tempo di integrazione e numero di letture fissati) con la precisione nominale dello strumento di misura (v. allegato 5): normalmente le fluttuazioni tra misure successive sono più grandi della precisione nominale, inoltre bisogna tener conto del tempo di carica dei condensatori interni all'apparecchio di prova (le prime misure dopo un cambiamento di tensione sono inaffidabili) e di una certa tendenza alla diminuzione della corrente con il passare del tempo.

Per effettuare una sequenza di misure di corrente I(V) in modo affidabile e riproducibile è quindi opportuno usare il **modo SWEEP** (spazzata) piuttosto che il modo DC: infatti in modo SWEEP è possibile inserire un ritardo costante tra la fornitura di un nuovo valore di tensione e la relativa misura di corrente, permettendo la stabilizzazione del valore di corrente, ed è possibile impostare un intervallo di tempo costante tra due misure successive a tensioni diverse.

Il tipo di SWEEP (spazzata) consigliato è quello denominato *linear staircase* (fig. 2-32 a pag. 2-56 del manuale), con i relativi parametri illustrati nella fig. 2-39 a pag. 2-64. Si può seguire l'esempio del paragrafo 2.19.5 alle pagine 2-68→2-70. In questo modo è possibile impostare una serie di tensioni crescenti equispaziate (usare l'intervallo 0-80 V); prestare attenzione al valore di "compliance" (limite di corrente) che non deve superare qualche decina di μA per non danneggiare il rivelatore, e al ritardo tra la fornitura di tensione e la misura di corrente che deve essere stabilito in base alle prove precedenti in modo DC.

Effettuare quindi una prima sequenza di misura in modo SWEEP a temperatura ambiente (il cui valore va registrato). I dati di corrente non vengono visualizzati durante la misura (contrariamente al modo DC), ma devono essere recuperati alla fine seguendo le istruzioni del paragrafo 2.24, illustrate dalle figure 2-55 e 2-56 a pag. 2-93 del manuale. Conviene inserire subito i dati della misura I–V in un foglio elettronico (ad es. ORIGIN) per farne un grafico e verificarne la regolarità.

Effettuare poi altre due misure sullo stesso rivelatore a due **altre temperature** superiori alla temperatura ambiente, con aumenti dell'ordine di 3-4 °C ogni volta.

Ripetere la misura I–V con un rivelatore a singola faccia (in questo caso un solo valore di temperatura è sufficiente) oppure con un altro rivelatore a doppia faccia, a seconda della disponibilità.

4 Parte 2: misura della caratteristica C–V

Per questa misura si aggiunge ai dispositivi elencati in precedenza il **misuratore LCR HP 4284A**, che va collegato all'apposito connettore quadruplo dell'apparecchio di prova HP 16065A. Il 4284A può stimolare il rivelatore con un segnale alternato di piccola ampiezza e frequenza variabile tra 20 Hz e 1 MHz (il 16065A ha però un limite inferiore di 50 Hz). La frequenza di misura è un parametro importante per i dispositivi MOS (metallo–ossido–semiconduttore); nel caso di semplici diodi p–n non irradiati non ci si attende una dipendenza significativa dalla frequenza.

Il misuratore LCR da solo può fornire tensioni in continua fino a ± 40 V, che in generale non sono sufficienti per il completo svuotamento di un rivelatore a silicio; tramite l'apparecchio di prova 16065A (v. allegato 3) è possibile fornire una tensione continua esterna fino a ± 200 V (nel nostro caso la sorgente di tensione esterna è il Keithley 236/237) che si somma alla tensione alternata sinusoidale fornita dal 4284A.

Per rendersi conto della precisione del misuratore HP 4284A può essere utile confrontarlo con il misuratore LCR portatile mod. B131. Procurarsi un condensatore da qualche decina di pF ed effettuare una misura di capacità con il B131 alla frequenza di 1 kHz; avendo scelto la portata fino a 1000 pF lo strumento dovrebbe richiedere preventivamente la calibrazione a circuito aperto. Dopo la calibrazione, inserire i piedini del condensatore nelle fessure del misuratore. La misura di capacità viene fatta nel modo $C_p - R_p$, ovvero con un modello comprendente una resistenza parassita in parallelo. Annotare l'errore di misura (pag. 11 del manuale del B131).

Misurare lo stesso condensatore con il misuratore di precisione HP 4284A (vedere qui sotto le istruzioni generali) e confrontare i due risultati. Fare attenzione ad usare sul 4284A la stessa frequenza di 1 kHz e lo stesso modo $C_p - R_p$, e ricordarsi di effettuare la calibrazione a cicuito aperto (OPEN).

Per effettuare la misura di capacità dopo che la tensione DC sul rivelatore è stabilizzata si può collegare mediante cavo BNC il TRIGGER OUT del Keithley 236 all'EXT TRIGGER dell'HP 4284A; occorre poi accertarsi che il "Trigger Mode" del 4284A sia su trigger esterno (opzione EXT dal menu MEAS SETUP), e che nel TRIGGER SETUP del 236/237 siano impostate le seguenti condizioni: INTERNAL ORIGIN, *SRC DLY MSR IN, SRC DLY MSR* OUT (*per maggiori dettagli vedere le pagine da 2–81 a 2–91 del manuale Keithley*). Regolare i tempi di misura sui due strumenti in modo da avere misure stabili.

Se la sincronizzazione tra i due strumenti non dovesse funzionare, sarà necessario lanciare manualmente prima la generazione di un valore di tensione sul 236/237 (pulsante MANUAL TRIGGER) e poi la misura di capacità sul 4284A.

Effettuare/verificare i collegamenti indicati nello schema in allegato 1, ma non inserire il rivelatore nelle fasi 1, 2 e 3. *Tenere presenti le pagine da 2–1 a 2–16 del manuale 4284A per la descrizione del pannello frontale e posteriore.*

La misura di capacità si articola in più fasi (*si può seguire in linea di massima l'esempio alle pagine da 6–24 a 6–27 del manuale, con qualche modifica*), nelle prime tre si può fissare la tensione fornita dal Keithley 236 a un valore di 10 V, mentre nella quarta fase (la misura C–V vera e propria) la tensione fornita dal Keithley 236/237 dovrà essere variata:

1. Impostazione delle condizioni di misura sul 4284A, nel nostro caso: fun-

zione C_s–R_s (adatta per rappresentare il rivelatore a silicio in polarizzazione inversa: capacità con resistenza parassita in serie), frequenza di misura (per es.) di 10 kHz e poi di 100 kHz, livello del segnale sinusoidale di test dell'ordine di qualche centinaio di mV;

2. Effettuazione della correzione OPEN (circuito aperto): per la massima precisione conviene inserire nel 16065A la piastra senza il rivelatore in modo da tener conto della capacità dei contatti;

3. Effettuazione della correzione SHORT (corto circuito): aggiungere l'apposito ponticello sul connettore della piastra in modo da sostituire il rivelatore con un corto circuito;

4. Misura vera e propria di capacità in funzione della tensione con un rivelatore montato sulla piastra: vedere dettagli qui sotto.

Dopo aver memorizzato le correzioni OPEN e SHORT risp. nelle fasi 2 e 3 ed averle attivate (*per maggiori dettagli fare riferimento alle pagine da 4–18 a 4–24 del manuale 4284A*; le correzioni rimangono valide finchè non si spegne lo strumento o si cambia la piastra), si può iniziare la fase 4 con il rivelatore montato all'interno dell'HP 16065A.

Le misure C–V possono essere effettuate a temperatura ambiente (registrare comunque il valore di temperatura). Effettuare una serie di misure con tensione da 0 a 80 V su uno dei rivelatori (a doppia faccia o a faccia singola), usando la **frequenza di 10 kHz**.

Ripetere poi l'intera serie di misure alla **frequenza di 100 kHz**.

Effettuare le due serie di misure (f = 10 kHz e f = 100 kHz) su un secondo rivelatore, ma solo se rimane tempo.

5 Acquisizione di misure I–V con LabView

SOLO SE RIMANE TEMPO: Provare ad acquisire una misura in modo SWEEP dal Keithley 236/236 con un programma LabView (programmare solo la lettura dei dati, lasciando la fase di impostazione e il comando di trigger in modo manuale).

6 Elaborazione dati

6.1 Misure di corrente

Per quanto riguarda i dati I–V è necessario calcolare la corrente per unità di area (usando l'area geometrica del rivelatore) alla tensione di svuotamento (determinata tramite la curva C–V, come indicato qui sotto), e inoltre la corrente per strip: questo parametro è uno degli elementi che concorrono a determinare il rumore una volta che il rivelatore sia collegato a un preamplificatore. Si tenga presente che in un esperimento agli acceleratori la corrente aumenterà con il tempo (anche di alcuni ordini di grandezza) a seguito del danneggiamento da radiazione.

Inoltre è opportuno verificare la dipendenza dalla temperatura T della corrente di saturazione inversa (v. ad es. S.M.Sze, Semiconductor Devices, paragrafo 3.4.3, formula (73)) e la forma della curva I–V a basse tensioni (v. ad es. *ibidem*, fig. 18b). Il rapido aumento della corrente a tensioni superiori a quella di svuotamento (fenomeno di rottura o "breakdown" della giunzione) è analizzato ad es. nel paragrafo 3.6 dello Sze, *op.cit.*

6.2 Misure di capacità

Per quanto riguarda i dati C–V è necessario valutare la tensione di svuotamento di ciascun rivelatore: a tale scopo si possono eseguire (ad es.) due fit lineari ai due tratti rettilinei della curva $1/C^2$ in funzione di V, e si può definire tensione di svuotamento la tensione di intersezione delle due rette (si assume in questo caso di avere a che fare con una giunzione a gradino). Per maggiori dettagli sulla forma della curva C–V, vedere ad es. il paragrafo 3.3 dello Sze, *op.cit.*

Infine, dal valore asintotico della capacità e dall'area geometrica del rivelatore è possibile valutare lo spessore e confrontarlo con quello fornito dal costruttore.

7 Documenti allegati

1. schema dei collegamenti per le misure C–V
2. dettaglio dei collegamenti per trigger e controllo temperatura
3. specifiche della "test fixture" (apparecchio di prova) HP 16065A
4. specifiche dei rivelatori "design W" (prodotti dalla Micron Semiconductor)
5. specifiche sulla precisione della SMU Keithley 236/237
6. specifiche sulla precisione del misuratore LCR HP 4284A
7. *Manuali a disposizione in laboratorio: Keithley Model 236/237/238 S.M.U. Operator's Manual, Hewlett Packard 4284A Precision LCR Meter Operation Manual*