

## Transistor di carta (10 punti)

La tecnologia elettronica nella società moderna si basa su un dispositivo semplice ma potente: il transistor, che può essere utilizzato sia come interruttore che come amplificatore. In modalità interruttore il transistor viene utilizzato per la memorizzazione e l'elaborazione di informazioni digitali.

Qui analizzeremo due tipi di transistor a effetto di campo (FET = Field Effect Transistor): il JFET (transistor a effetto di campo di giunzione) e il TFT (transistor a campo sottile).

Spieghiamo brevemente come funziona un FET. Un FET è un dispositivo non lineare a 3 terminali [i terminali sono chiamati Base (Gate G); emettitore (Source S); collettore (Drain D)] che può controllare il flusso di corrente tra Source e Drain agendo sulla tensione applicata tra Gate e Source. In un'analogia semplice, benché imperfetta, un FET funziona in modo simile a un rubinetetto dell'acqua, dove la manopola che controlla il flusso dell'acqua svolge un ruolo analogo al Gate.

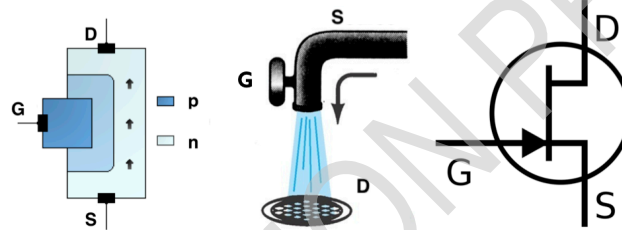


Figura 1. Schema di un JFET a "canale n" (a sinistra), la sua analogia idraulica (al centro) e il simbolo del circuito elettrico (a destra). Le frecce nello schema del JFET (figura a sinistra) indicano il flusso della corrente elettrica tra Source (S) e Drain (D) attraverso lo stretto "canale n". La larghezza del canale dipende dalla tensione applicata tra Gate (G) e Source (S).

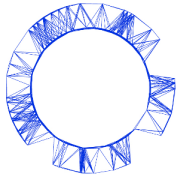
Il Junction-FET (JFET) funziona grazie alle proprietà della giunzione (del contatto) tra due tipi di un materiale semiconduttore, come il silicio drogato p e n. Per questo motivo viene chiamato "Junction"-FET. Un JFET contiene uno stretto canale attraverso il quale scorre la corrente tra Source e Drain, e in un FET a "canale n" questo canale è fatto di materiale di tipo n. La larghezza di questo canale può essere controllata in modo preciso applicando una tensione **negativa** tra Gate e Source,  $V_{GS} = V_G - V_S$ . Per  $V_{GS}$  fissato, la corrente che scorre tra Source e Drain dipende in maniera non lineare dalla tensione applicata tra Drain e Source,  $V_{DS} = V_D - V_S$ . Tuttavia, se la tensione  $V_{DS}$  è piccola, la corrente dipende in modo lineare dalla tensione applicata, pertanto il JFET segue la legge di Ohm. Tuttavia, la resistenza di uscita,  $R_{DS} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}}$  dipende fortemente dalla tensione  $V_{GS}$  applicata, e segue con ottima approssimazione la legge:

$$R_{DS} = \frac{R_{DS}^0}{1 - V_{GS}/V_P}, \quad (1)$$

dove  $R_{DS}^0$  è la resistenza di uscita per  $V_{GS} = 0$  e  $V_P < 0$  è un parametro relativo al JFET chiamato la *tensione di pinch-off*. Chiaramente, alla tensione di pinch-off, il FET blocca completamente il flusso di corrente.

Per ogni fissato  $V_{GS} > V_P$ , la corrente tra Source e Drain inizierà a discostarsi dal comportamento lineare all'aumentare  $V_{DS}$ , e ad un certo punto raggiungerà la saturazione ad un valore quasi costante. Chiamiamo  $I_{DSS}$  la corrente di saturazione per  $V_{GS} = 0$ . Nel regime di saturazione (cioè per  $V_{DS}$  grande), la corrente di saturazione dipende da  $V_{GS}$  nella maniera seguente:

$$I_{DS} = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$



Dobbiamo sottolineare due caratteristiche molto importanti di un JFET. Sebbene la sua resistenza di uscita (controllata dalla tensione) possa essere molto bassa, la resistenza di ingresso ( $R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$ ) è estremamente alta, solitamente maggiore di  $10^9 \Omega$ , quindi questo dispositivo utilizza pochissima corrente in ingresso. Inoltre, la capacità di un JFET di piccole dimensioni è piuttosto bassa, il che lo rende un dispositivo molto veloce che può "aprirsi e chiudersi" con frequenze superiori al MHz.

Ora procediamo a descrivere come funziona un diverso tipo di FET, il TFT.

Come qualsiasi altro FET, il TFT consente il controllo di una corrente tra due contatti, gli elettrodi "Drain" e "Source", mediante un potenziale applicato al terzo elettrodo, il Gate.

L'elettrodo Gate è fisicamente separato dallo strato di semiconduttore attraverso un dielettrico che consente la creazione di un campo elettrico verticale che controlla i portatori di carica liberi presenti nel semiconduttore (effetto di campo). Lo strato di dielettrico può essere sostituito da una membrana elettrolitica come un foglio di carta in cui esistono ioni mobili (vedi figura 2) e in questo caso la tensione applicata al Gate spingerà gli ioni con carica opposta verso l'interfaccia del semiconduttore, creando uno strato di cariche ioniche che modificherà la densità dei portatori liberi di carica presenti all'interno del semiconduttore (Electrolyte Gated Transistors - EGT). I ricercatori della "Universidade Nova" di Lisbona, sono stati pionieri nel 2008 nello sviluppo del "transistor cartaceo", e sono leader mondiali in questo campo.

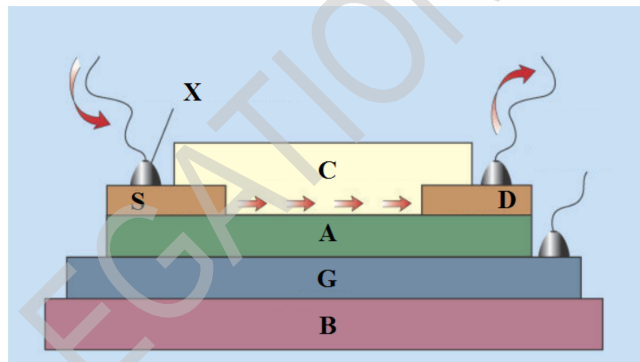


Figura 2. Schema del transistor a pellicola sottile (TFT) da utilizzare in questo problema. S = Source; D = Drain; G = Gate; A = carta (strato di dielettrico); B - substrato; C - strato semiconduttore (ossido di gallio-indio-zinco (GIZO)); X - Contatti metallici. Le frecce indicano il flusso corrente.

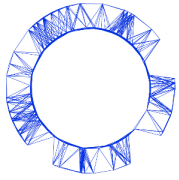
Analogamente ai JFET, i transistor TFT possono operare in due modalità operative fondamentali, una modalità lineare e una modalità di saturazione. Al contrario dei JFET, la capacità intrinseca dei TFT è un parametro rilevante per le prestazioni del dispositivo.

In questo problema sperimentale ti si chiede di esaminare come funziona un JFET a canale n e un TFT cartaceo.

Devi determinare le curve caratteristiche (CC) di questi dispositivi misurando la corrente tra S e D ( $I_{DS}$ ) attraverso l'applicazione di varie tensioni a G ( $V_{GS}$ ) e D ( $V_{DS}$ ).

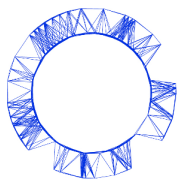
Le due CC più importanti sono le curve di output e di trasferimento:

- **Curva di output:** per questa curva la corrente tra Source e Drain ( $I_{DS}$ ) verrà misurata e tracciata in funzione della tensione tra Source e Drain ( $V_{DS}$ ), lasciando variare  $V_{DS}$  da 0 V fino a +3 V, in passi successivi, mantenendo  $V_{GS}$  costante.



- **Curva di trasferimento:** per questa curva,  $I_{DS}$  sarà misurata e graficata come funzione di  $V_{GS}$ .  $V_{DS}$  verrà mantenuta costante con un valore appropriato in modo che il transistor funzioni in **modalità di saturazione** e  $V_{GS}$  verrà fatto variare da  $-3\text{ V}$  a  $0\text{ V}$  in passi successivi.

DELEGATION PRINT



### Materiale

Il seguente materiale (Figura 3) è fornito per questo problema sperimentale:

1. multimetro
2. transistor JFET (fornito all'interno di una busta di plastica etichettata)
3. cavi (10) con morsetti a coccodrillo
4. morsetti a coccodrillo piatti (4, forniti all'interno di un sacchetto di plastica)
5. batterie ( $4 \times 1,5$  V)
6. portabatterie
7. piastrina forata (mini-breadboard) con supporto
8. cavetti sottili (3) per i collegamenti alla piastrina forata
9. matita HB
10. penna con inchiostro argentato conduttore (Circuit Scribe)
11. cronometro
12. foglio di carta con circuiti stampati e TFT incorporato che utilizza la carta come strato dielettrico (Figura 4)
13. borsa con materiale di scrittura (1 penna, 1 matita, 1 gomma / temperino, 1 righello)



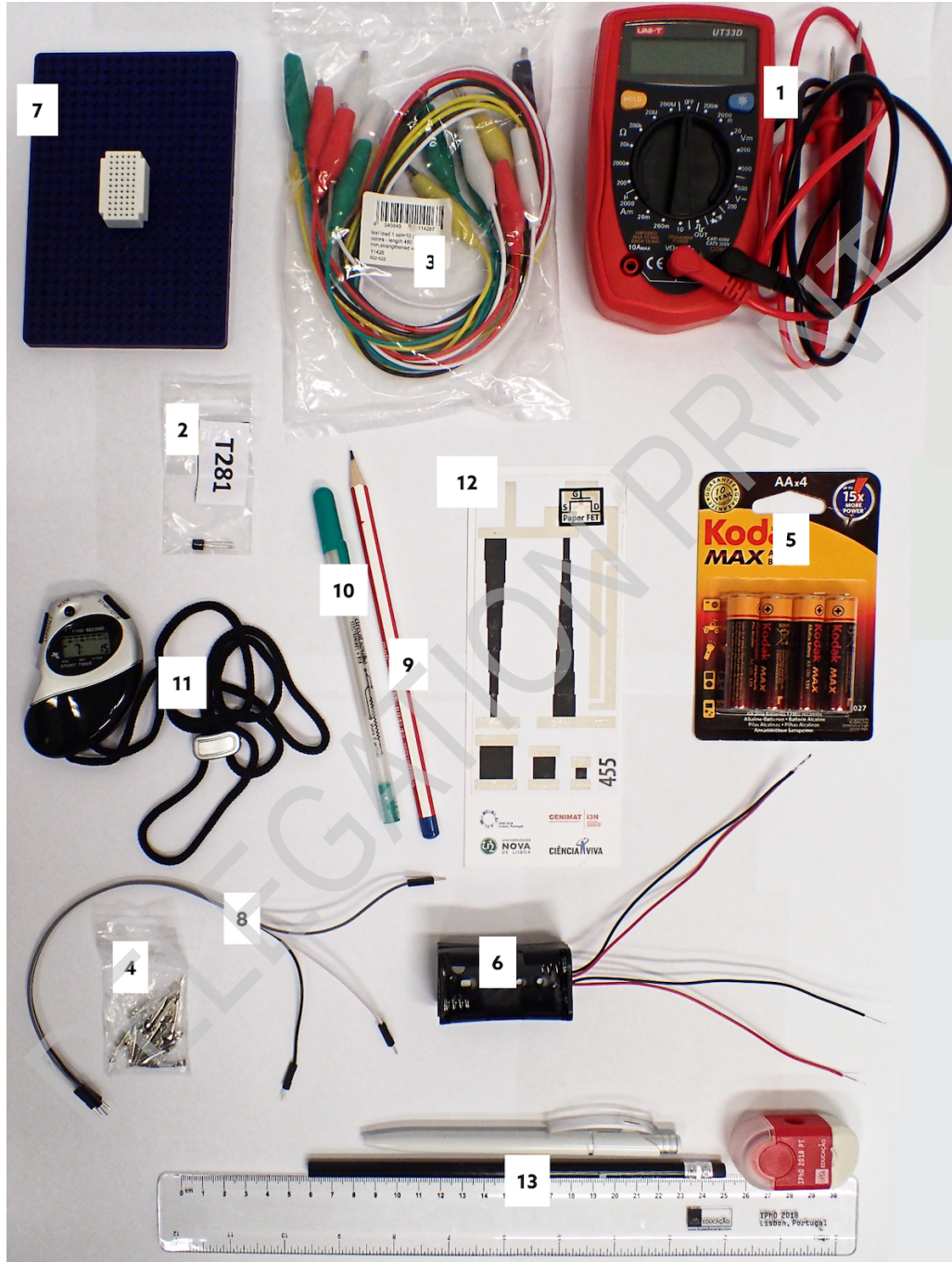
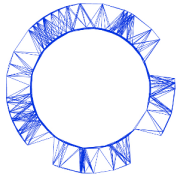


Figura 3. Materiale sperimentale

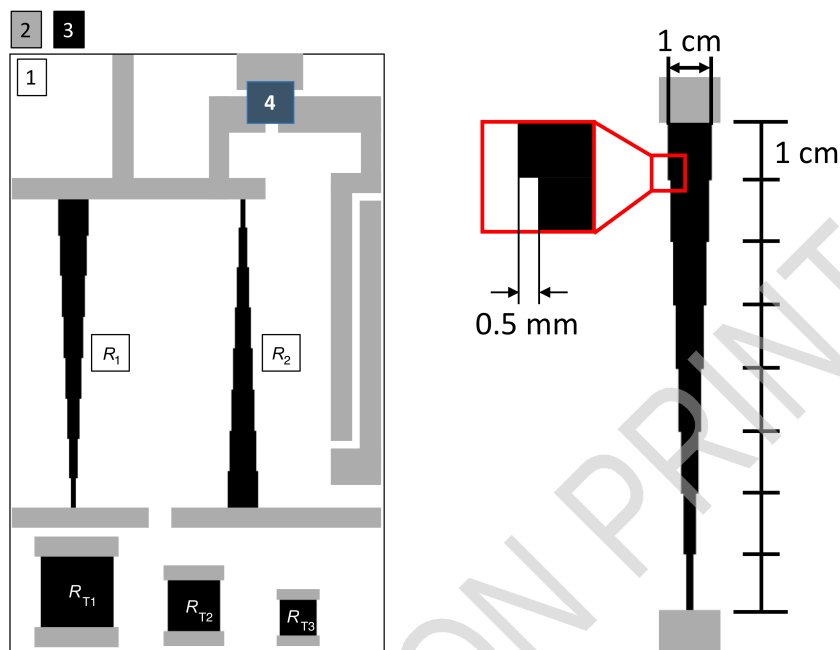
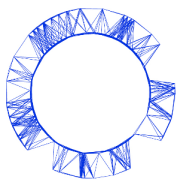
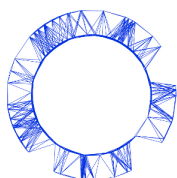


Figura 4. A sinistra: foglio di carta con circuiti stampati incluso nel materiale: carta (1), piste conduttrici argentate (2), piste resistive al carbonio (3), transistor di carta (4), resistenze del partitore di tensione ( $R_1$  e  $R_2$ ). A destra: dimensioni fisiche delle resistenze del partitore di tensione (i passi di 0,5 mm sono costanti per ciascun pezzo).

### Precauzione importante:

**Non piegare** il foglio di carta con i circuiti stampati ed il transistor inserito poichè si potrebbe danneggiare. Cerca di lasciarlo il più possibile piatto durante le misure al fine di raggiungere i migliori risultati.

Ai fini delle misure è importante considerare le seguenti **importanti informazioni**:



- Il multimetro deve operare sempre in **modalità CD**
- Il multimetro non autoregola la portata e devi attentamente scegliere quelle più appropriate per le tue misure. Nel caso il valore sia fuori dall'intervallo delle letture, il display mostrerà "1" o "-1" (a sinistra del display) per valori positivi e negativi rispettivamente, e devi cambiare ad una portata più bassa.
- Le portate alle basse correnti sono protette da un fusibile da 315 mA. Evita in tutti i modi di creare un corto circuito tra la batteria e il multimetro poichè un'elevata corrente lo brucerà!
- La resistenza interna del multimetro usato come voltmetro è  $10\text{ M}\Omega$ .
- Quando è usato come amperometro, la resistenza interna del multimetro dipende dalla portata come mostrato nella seguente tabella:

portata	$R_{\text{int}}/\Omega$
200 mA	1.0
20 mA	10
2 mA	100

tabella 1. Resistenza interna del multimetro fornito quando è usato come amperometro.

Perciò, quando il multimetro viene usato come amperometro nella modalità DC, ci sarà una tensione di 200 mV ai suoi capi nel valore massimo di fondo scala quando viene impiegato in ciascuna delle tre portate disponibili.

## Parte A. Dimensionamento del circuito ( 2.5 punti)

Per raggiungere le necessarie tensioni  $V_{\text{DS}}$  e  $V_{\text{GS}}$  userai due resistori di carbone stampati sulla carta ( $R_1$  e  $R_2$ , vedi Fig. 4) e un partitore di tensione per dimensionare il circuito alle corrette tensioni.  $R_1$  e  $R_2$  rappresenteranno la resistenza totale ( $R_{\text{tot}}$ ) del partitore di tensione. Per esempio, quando applichi una tensione costante (in questo caso circa 3 V della batteria) ai capi di  $R_1$ , per esempio, avremo una differenza di potenziale di 3 V ( $V_{\text{in}}$ , polo positivo della batteria) rispetto a terra (0 V). Da ora in poi indicheremo come terra il contatto comune delle due batterie.  $R_{\text{tot}}$  può essere diviso essenzialmente in due resistenze ( $R_x$  e  $R_y$ ) per ottenere il valore voluto  $V_{\text{out}}$  (Figura 5).

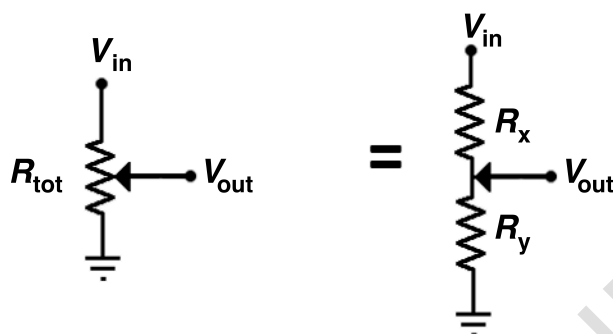
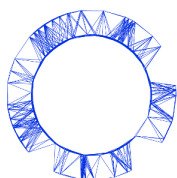


Figura 5. Il partitore di tensione.

<b>A.1</b>	Scrivi l'espressione per la tensione in uscita, $V_{out}$ , in funzione di $V_{in}$ e delle resistenze $R_x$ e $R_y$ .	0.2pt
<b>A.2</b>	Misura la resistenza dei tre resistori test in fondo al foglio ( $R_{T1}$ , $R_{T2}$ and $R_{T3}$ ) con il multimetro. Raccogli sufficienti misure in differenti posizioni sui contatti d'argento. Inserisci i valori nel Foglio Risposte. Calcola il valore medio e stima l'incertezza della resistenza di ogni resistore test.	0.5pt
<b>A.3</b>	Dimostra che la resistenza di una sottile pellicola quadrata di una data resistività $\rho$ dovrebbe essere indipendente dalla lunghezza del lato. Questa resistenza indipendente dalle dimensioni è chiamata <i>resistenza del foglio (sheet resistance)</i> ed è denotata con $R_{\square}$ .	0.3pt
<b>A.4</b>	Calcola il valore medio della resistenza del foglio della pellicola di carbone dai dati in A.2 e ottieni la resistività, $\rho$ , della pellicola di carbone stimando la sua incertezza (considera uno spessore $t$ della pellicola di carbone pari a $20 \pm 1 \mu\text{m}$ ).	0.4pt
<b>A.5</b>	Mostra che il valore teorico delle resistenze $R_1$ e $R_2$ è $R_1 = R_2 = \kappa R_{\square}$ , $\kappa \sim 14.2897$ . Misura $R_1$ e $R_2$ e scrivi i valori nel Foglio Risposte. Determina il valore sperimentale di $\kappa$ e confrontalo con il valore teorico.	0.5pt

Utilizzando la penna ad inchiostro argentato in dotazione, traccia 7 linee conduttive equamente separate tra loro lungo ognuno dei resistori forniti (come esemplificato in Figura 6). Queste linee individuali serviranno come punti di contatto per avere dei divisori di tensione.

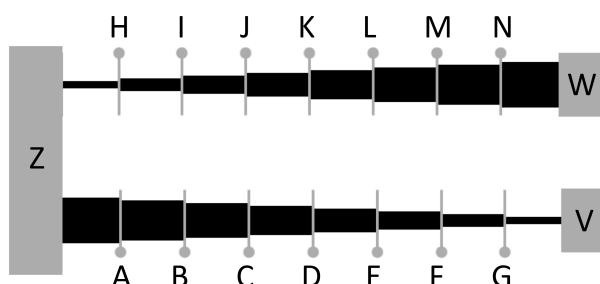
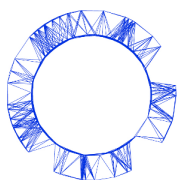


Figura 6. Esempio di linee tracciate e schema di denominazione dei punti di contatto.

- A.6** Misura le resistenze  $R_x$  e  $R_y$  per tutti i punti di contatto.  $R_x$  è definita come la resistenza tra il punto di contatto e i punti V (resistore 1) o W (resistore 2), e  $R_y$  è definita come la resistenza tra il punto di contatto e il punto Z. Compila le tabelle fornite nel Foglio Risposte. 0.3pt

Inserisci le 4 batterie AA nel portabatterie. Osserva attentamente la corretta polarità della batteria e assicurati di non produrre un cortocircuito. Successivamente, connetti le batterie come illustrato nella figura 7. Assicurati di non danneggiare le tracce argentate con i morsetti a "coccodrillo".

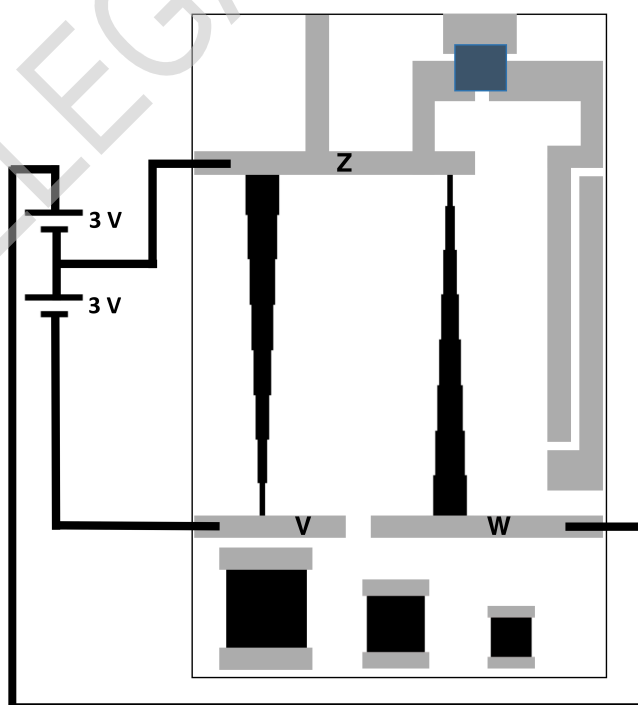
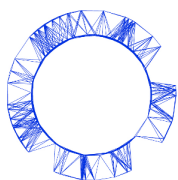


Figura 7. Connessioni delle batterie



- A.7** Misura  $V_{out}$  in ogni punto di contatto, essendo  $V_{out}$  la tensione misurata rispetto al punto Z e inserisci i valori nelle tabelle fornite del Foglio Risposte. 0.3pt

Ciò conclude la parte sul dimensionamento del circuito e puoi ora procedere a misurare le Curve Caratteristiche (CC) del transistor JFET

### Parte B. Curve Caratteristiche del transistor JFET (4.5 punti)

Al fine di caratterizzare il transistor JFET userai l'apparato illustrato in Figura 8. Inizia identificando i tre contatti (S, D e G) sul transistor JFET fornito - **presta attenzione alla corretta identificazione dei contatti, poichè il dispositivo non è simmetrico**. Puoi usare la piastrina forata con supporto per montare il transistor JFET. I cavetti sottili di collegamento forniti sono da impiegare con la piastrina forata.

Utilizzando i cavetti con i morsetti a "coccodrillo", collega a terra il Gate e il Source del transistor (punto Z del circuito a 0 V). Durante tutta questa parte del problema, il Source del JFET deve essere sempre collegata a terra.

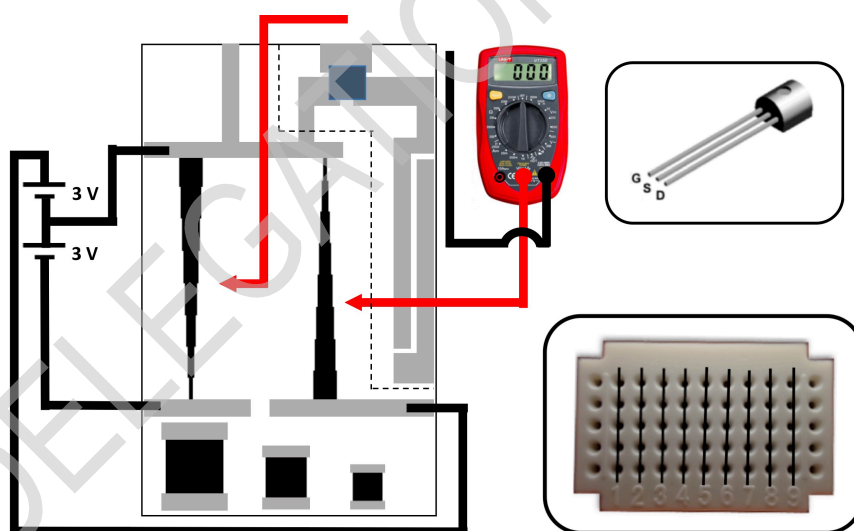
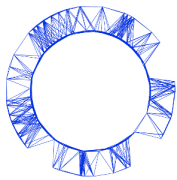


Figura 8. Montaggio per la determinazione delle curve caratteristiche del JFET. La parte del circuito interna alla regione tratteggiata che include il TFT non è da impiegare nella parte B del problema. Il riquadro superiore mostra come identificare il Gate, il Source e il Drain del transistor JFET. Il riquadro inferiore mostra come sono collegati i fori della piastrina.

Tutti i fori di una colonna numerata sono internamente collegati e isolati dai fori delle altre colonne. L'immagine del multimetro è solamente illustrativa: sei tenuto ad individuare l'appropriata modalità di misura e la portata con il selettore rotante del multimetro.



## Experiment



IPhO 2018  
Lisbon, Portugal

# Q1-11

Italian (Italy)

**B.1** Connetti a terra il gate del transistor ( $V_{GS} = 0$ ). Poi connetti uno dei cavetti del multimetro da usare come amperometro in modalità DC al drain del transistor e con l'altro cavetto tocca il punto con la tensione più alta disponibile sui divisori. Scrivi nel foglio risposte il valore della corrente  $I_{DS}$ . 0.2pt

**B.2** Misura la corrente  $I_{DS}$  per differenti tensioni positive applicate al Drain, mentre mantieni  $V_{GS} = 0$ . Poi cambia il circuito in modo da applicare una tensione negativa tra il Gate e il Source del transistor ( $V_{GS} < 0$ ) e ripeti la misura di  $I_{DS}$  in funzione della tensione positiva applicata tra il Drain e il Source. Compila la tabella fornita nel Foglio Risposte con i tuoi valori. 0.8pt

Quando il circuito con il divisore di tensione è connesso ad un carico a bassa resistenza (Figure 9), i valori forniti dal divisore di tensione,  $V_{out}^L$ , sono differenti dai valori nominali  $V_{out}$  misurati quando il carico ha un'elevata resistenza, come nel caso di un voltmetro ad alta impedenza.

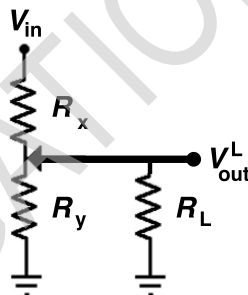


Figura 9. Divisore di tensione con carico.

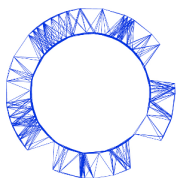
**B.3** Considera che il divisore di tensione sia collegato ad un carico  $R_L$ . Ottieni un'espressione per il fattore correttivo  $f = V_{out}^L / V_{out}$  in funzione di  $R_L$ ,  $R_x$  e  $R_y$ . 0.2pt

Il transistor JFET ha una bassa resistenza di uscita quando  $V_{GS} = 0$ , ovvero  $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$ . Comunque, questa resistenza aumenta in modo significativo quando il Gate è polarizzato negativamente rispetto al Source. Per  $V_{GS} < 0$  la resistenza di uscita segue strettamente la legge data dall'equazione (1).

**B.4** Usando gli appropriati fattori di correzione, calcola  $V_{DS}$ , la tensione tra Drain e Source, per tutti i punti misurati in B.2. Considera i seguenti dati nominali per il JFET impiegato in questo problema:  $R_{DS}^0 = 50 \Omega$ ,  $V_p = -1.4 V$ . 1.2pt

**B.5** Grafica le curve di output  $I_{DS}(V_{DS})$  per il transistor JFET. 0.5pt

## Experiment



IPhO 2018  
Lisbon, Portugal

# Q1-12

Italian (Italy)

**B.6** Considera il transistor in funzione per piccoli valori di  $V_{DS}$ . Ricava e valori *sperimentali* di  $R_{DS}$  del tuo JFET per diversi valori di  $V_{GS}$  e rappresenta i dati in un grafico. 0.5pt

**B.7** Grafica la curva di trasferimento  $I_{DS}(V_{GS})$  del transistor JFET per  $V_{DS} \sim +3$  V. 0.3pt

Quando il transistor JFET è in modalità di saturazione, la corrente  $I_{DS}$  segue più strettamente la legge espressa dall'equazione (2)

**B.8** Dai dati misurati ottieni  $I_{DSS}$  e la *tensione di pinch-off*,  $V_p$ , per il tuo dispositivo. Confronta il valore ottenuto di  $V_p$  con il valore nominale. 0.4pt

Un parametro importante del transistor JFET, in particolare quando è usato come amplificatore, è la cosiddetta transconduttanza del transistor,  $g$ , definita come

$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}. \quad (3)$$

Per una funzione di due variabili  $f(x, y)$ , la notazione  $\frac{\partial f}{\partial x}$  significa la derivata di  $f$  rispetto a  $x$  quando  $y$  è costante.

**B.9** Ricava, dalle curve di trasferimento misurate, la transconduttanza del dispositivo per  $V_{GS} = -0.50$  V. Confrontala con il valore calcolato ottenuto con il modello dell'equazione (2). 0.4pt

### Parte C. Il transistor a pellicola sottile di carta (2.0 punti)

D'ora in poi, non utilizzerai più il JFET, e tutte le seguenti attività e domande sono relative al transistor a pellicola sottile (TFT) situato nella parte alta del circuito stampato. Il Gate, Source e Drain del TFT sono contrassegnati nella Figura 10. Collega il Gate del TFT e la sua Source a terra. Anche in questa parte del problema la Source del TFT cartaceo deve sempre essere collegata al contatto comune delle batterie, cioè a 0 V, come mostrato nella Figura 10. Polarizzate il transistor con  $V_{DS} > 0$ , tramite uno dei circuiti di partizione di tensione (Figura 10). Verificate che della corrente attraversi l'amperometro.



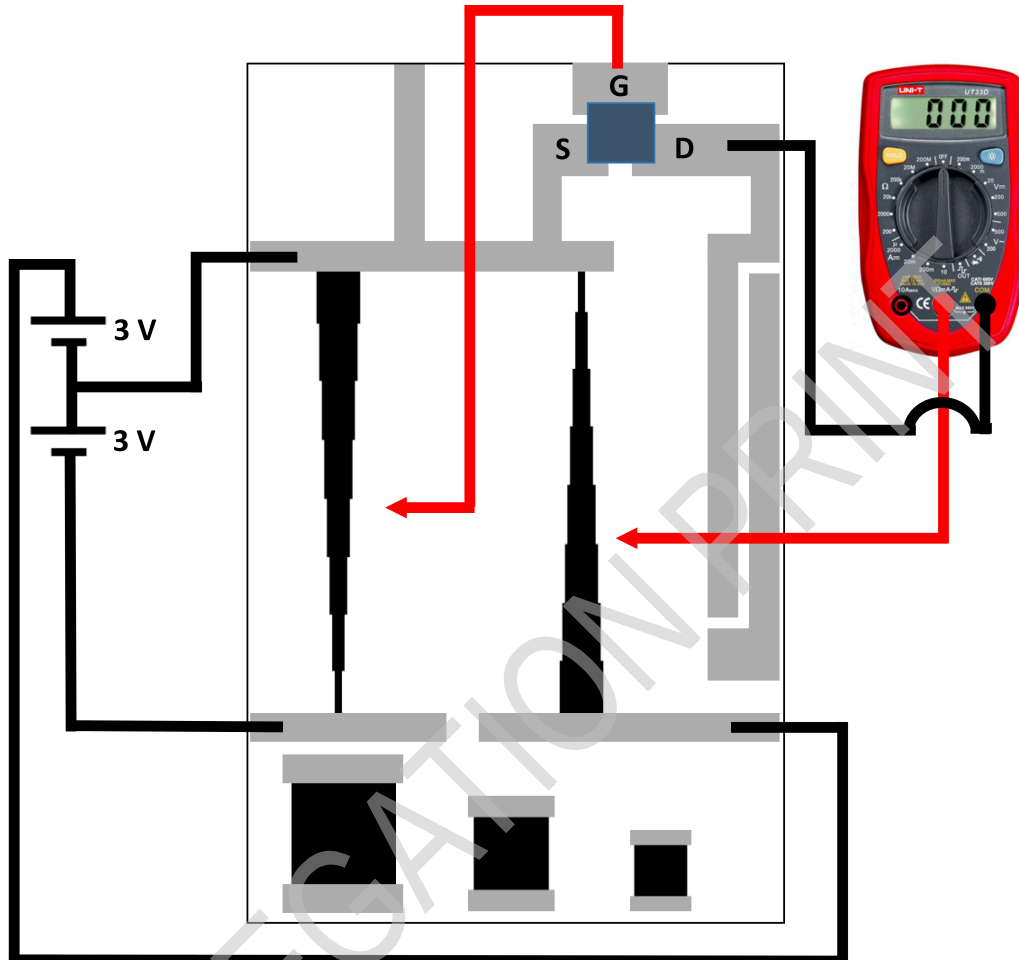
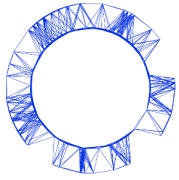
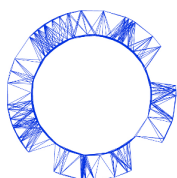


Figura 10. Impostazione per le misurazioni sul TFT cartaceo. L'immagine del multimetro è puramente illustrativa: spetta a te selezionare la modalità di misurazione e il range appropriati nel selettore ruotante del multimetro.

- |            |  |       |
|------------|--|-------|
| <b>C.1</b> | Applica una $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$ . Chiudi il transistor applicando $V_{GS} = -3.0 \text{ V}$ . Attendi 1 minuto in modo che il transistor si chiuda. Annota nel foglio risposte il valore di corrente residuale, $I_{\text{closed}}$ . Quindi apri il transistor applicando $V_{GS} = 0$ , mentre mantieni $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$ . Misura la corrente come funzione del tempo, a partire dall'istante in cui apri il transistor, per almeno 5 minuti e raccogli i dati $I_{DS}(t)$ nel foglio risposte. | 0.8pt |
| <b>C.2</b> | Traccia il grafico $I_{DS}(t)$ . C'è una sovrapposizione di due processi esponenziali nel tempo, uno con una costante di tempo molto più grande ( $\tau_2$ ) rispetto all'altro ( $\tau_1$ ). Determina la costante di tempo più piccola, $\tau_1$ .   | 1.2pt |

### Parte D. Circuito inverter (1.0 punti)

Nell'ambito dei circuiti microelettronici, uno dei più importanti circuiti è l'inverter, che è in grado di invertire un segnale d'ingresso digitale. Ad esempio se  $V_{in}$  è alto, allora  $V_{out}$  è basso e viceversa. Un transistor è ancora una volta alla base di questo circuito, e uno dei modelli più semplici è il cosiddetto amplificatore a



Source comune (a sorgente comune), illustrato nella figura 11, che utilizza un transistor e una resistenza di carico ( $R_L$ ). In questo caso  $V_{in} = V_{GS}$  e  $V_{out}$  è la tensione misurata sull'elettrodo di Drain del transistor. Quindi, in questa parte, controlleremo ciò che accade a  $V_{out}$  mentre facciamo variare  $V_{GS}$  da -3 V a 0 V.

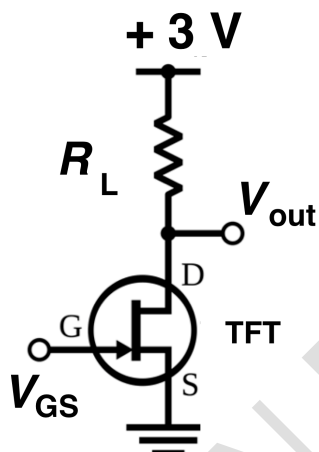


Figura 11. Amplificatore a Source comune e circuito inverter

Nella configurazione illustrata in Figura 11, il transistor è il TFT di carta e  $R_L$  è una resistenza di carico che aggiungerai ora, manualmente, collegando il contatto di Drain del transistor con il contatto  $V_{in}$  utilizzando una traccia di matita, come indicato nella Figura 12. Mentre scrivi con la matita, stai depositando sulla carta sottili strati di grafite conduttrice, quindi più strati disegni uno sull'altro, più bassa sarà la resistenza che ottieni. Mentre disegni  $R_L$ , assicurarti di monitorare in continuazione la sua resistenza. Per ottenere  $V_{out}$  il più vicino possibile a 0 V, la resistenza di carico dovrebbe essere abbastanza grande. Quindi, mentre disegni la resistenza, cerca di ottenere un valore vicino a  $R_L = 200 \text{ k}\Omega$ .

Puoi utilizzare la matita per diminuire  $R_L$  o la gomma per aumentarla. Dovresti mirare a ottenere un valore che differisca non più del 10 per cento dal valore desiderato.

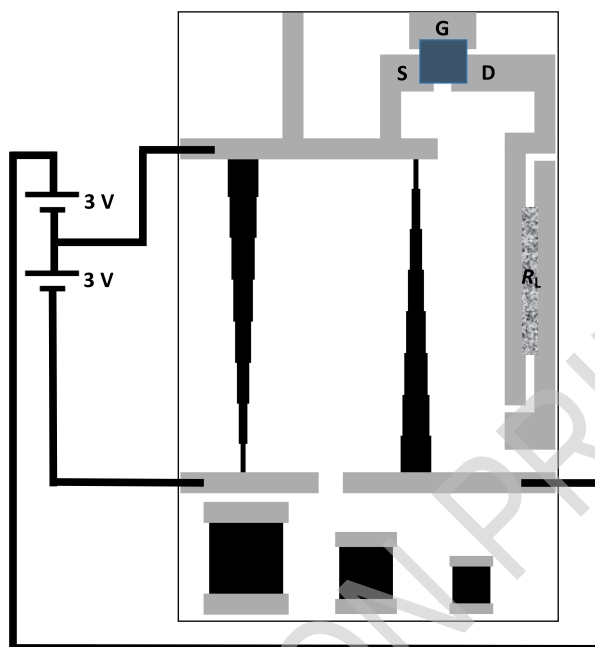
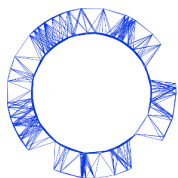


Figura 12. Setup per la configurazione dell'inverter/amplificatore a Source comune.

Usa la matita HB in dotazione e disegna a mano una resistenza al carbonio del valore di  $R_L \simeq 200 \text{ k}\Omega$  da utilizzare come resistenza di carico del TFT di carta per costruire il circuito dell'inverter (vedi la Figura 12).

**D.1** Annota nel foglio risposte la misura del valore di  $R_L$  che hai ottenuto. Configura il circuito dell'inverter (Figura 12) usando la resistenza della traccia in carbonio e il TFT di carta. Prima delle misurazioni, ricorda che devi spegnere completamente il transistor applicando una  $V_{GS} = -3 \text{ V}$  e attendendo circa 1min. Quindi misura  $V_{out}$  mentre fai variare  $V_{GS}$  tra -3 V e 0 V e prendi i valori di  $V_{out}$  con un tempo di stabilizzazione per ciascuna misura fino a un massimo di 100s. Scrivi i valori misurati nel foglio delle risposte. 0.5pt

**D.2** Fai il grafico con le misure di  $V_{out}(V_{in})$  (curva di trasferimento della tensione) e disegna una curva che fitti i punti sperimentali. 0.5pt