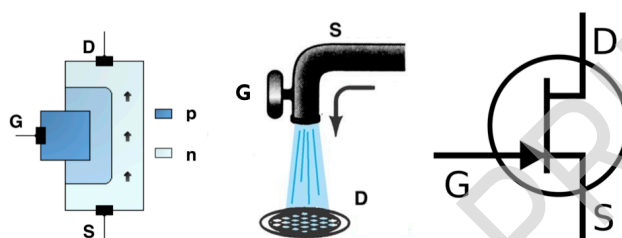


Papirtransistor (10 point)

Moderne elektronisk teknologi er baseret på transistoren, som kan bruges til meget forskelligt.

Vi vil her undersøge to typer af Field Effect Transistors (FET): JFET (Junction Field Effect Transistor) og TFT (Thin Field Transistor).

En transistor kan sammenlignes med en vandhane, der er en *Gate* (G), som kontrollerer om der går strøm igennem fra *Source* (S) til *Drain* (D).



Figur 1. Skematisk tegning af en n-kanal JFET (venstre), en vandhaneanalogi (midten) og et kredsløbssymbol (højre). Pilene i JFET indikerer den elektriske strøm mellem *Source* (S) og *drain* (D) gennem den smalle n-kanal. Bredden af kanalen afhænger af spændingsfaldet fra *Gate* (G) og *Source* (S).

JFET bygger på egenskaberne mellem 2 typer af halvledere, som *p-doped* og *n-doped* silicium. En JFET har en smal kanal, gennem hvilken, der løber en strøm fra *Source* mod *Drain*. I en n-kanal FET er denne kanal lavet af n-type materiale. Bredden af denne kanal kan kontrolleres præcist ved at påtrykke en spænding $V_{GS} = V_G - V_S$ (det modsatte af spændingsfald fra G til S). For en fast værdi af V_{GS} afhænger strømmen mellem S og D ikke-lineært af den anvendte spændingsforskel mellem *Drain* og *Source*, $V_{DS} = V_D - V_S$. Når V_{DS} er lille afhænger strømmen dog lineært af spændingen, altså vil JFET opføre sig efter Ohms lov. Resistansen, $R_{DS} = V_{DS}/I_{DS}$, vil imidlertid være stærk afhængig af V_{GS} og adlyde følgende lov:

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

hvor R_{DS}^0 er resistansen når $V_{GS} = 0$. Størrelsen $V_P < 0$ er en JFET parameter, som kaldes *pinch-off voltage*. Ifølge denne ligning, vil FET lukke for strømmen ved *pinch-off voltage*.

For ethvert fast $V_{GS} > V_P$ vil strømmen mellem *source* og *Drain* afvige fra den lineære opførsel, efterhånden som V_{DS} forøges, og vi siger at den når en mætningstilstand, når den ikke ændres yderligere. Lad I_{DSS} være strømmen i denne mætningstilstand, når $V_{GS} = 0$. I mætningsområdet (stor værdi af V_{DS}) vil strømmen afhænge af V_{GS} således:

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

JFET'er har 2 vigtige egenskaber. Selvom dens spændingskontrollerede outputresistans kan være lille er inputresistansen ($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$) ekstremt stor. Typisk større end $10^9 \Omega$, så apparatet bruger en meget lille inputstrøm. Yderligere er kapacitansen lille, så den kan åbne og lukke med en frekvens i MHz området.

TFT'en virker ved diverse lag af halvledere, som styrer hvor ladninger kan bevæge sig. Se figur 2.

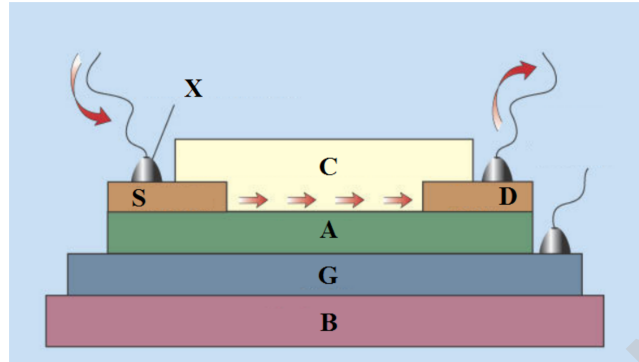
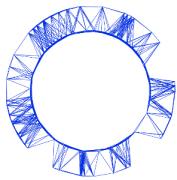


Figure 2. Skematisk tegning af en TFT.

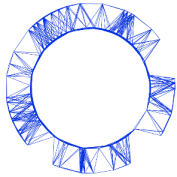
Tilsvarende til JFET'er har TFT'er både en lineær og en mættet tilstand. Modsat JFET'er er den indre kapacitans for en TFT et vigtigt træk.

I dette eksperiment skal du undersøge hvordan en n-kanal JFET og en *papir* TFT virker.

Du vil bestemme karakteristikker ved at måle strømmen mellem Source (S) og Drain (D), (I_{DS}) ved hjælp af spændinger ved Gate (G) (V_{GS}) og Drain (D), (V_{DS}).

De to vigtigste karakteristikker er

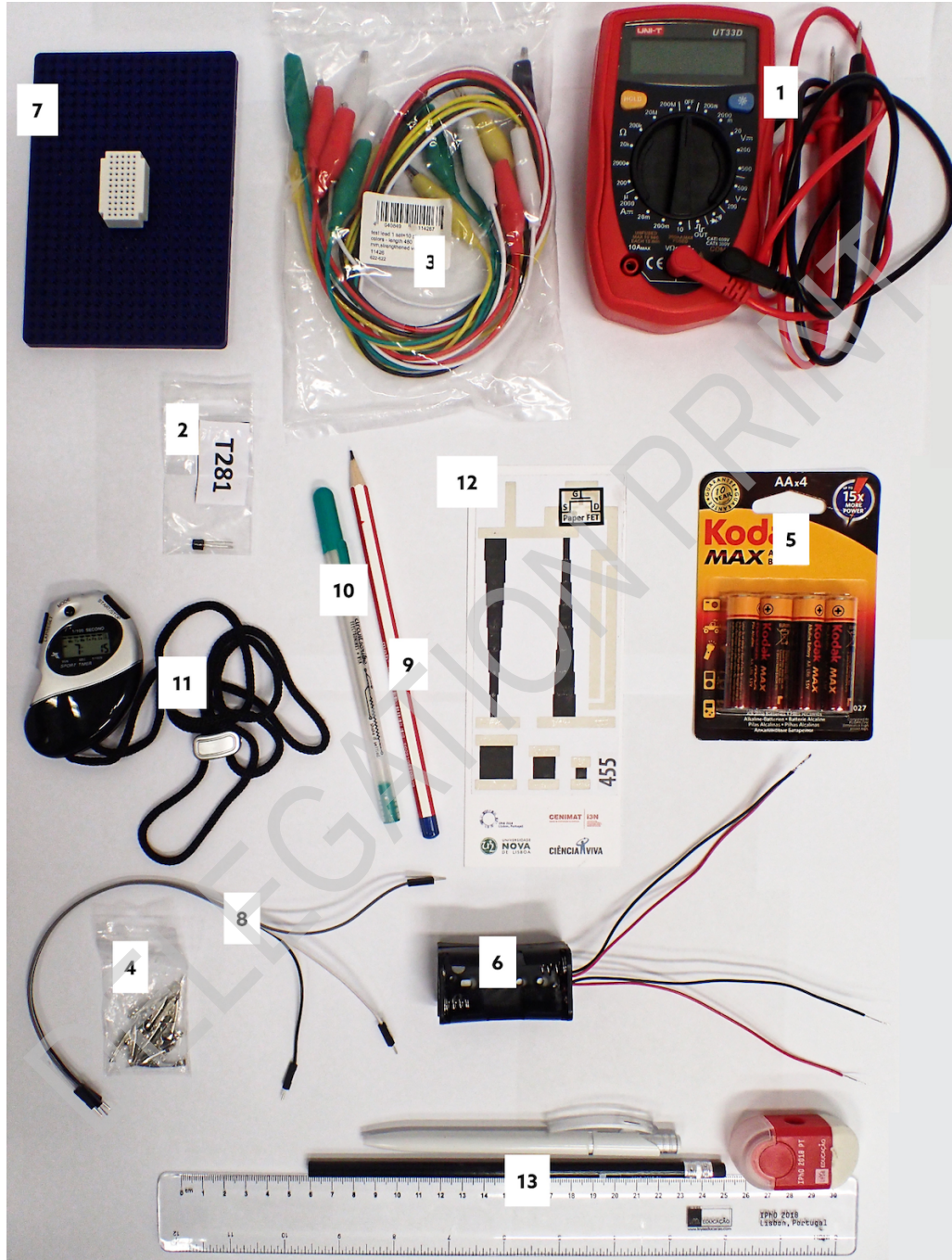
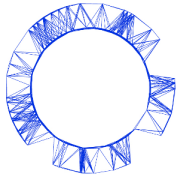
- **Output kurve:** Kurven viser I_{DS} som funktion af V_{DS} fra 0 V til +3 V, for konstant V_{GS} .
- **Transferkurve:** Kurven viser I_{DS} som funktion af V_{GS} når V_{DS} er konstant med en passende værdi i mætningsområdet. V_{GS} løber fra -3 til 0 V.



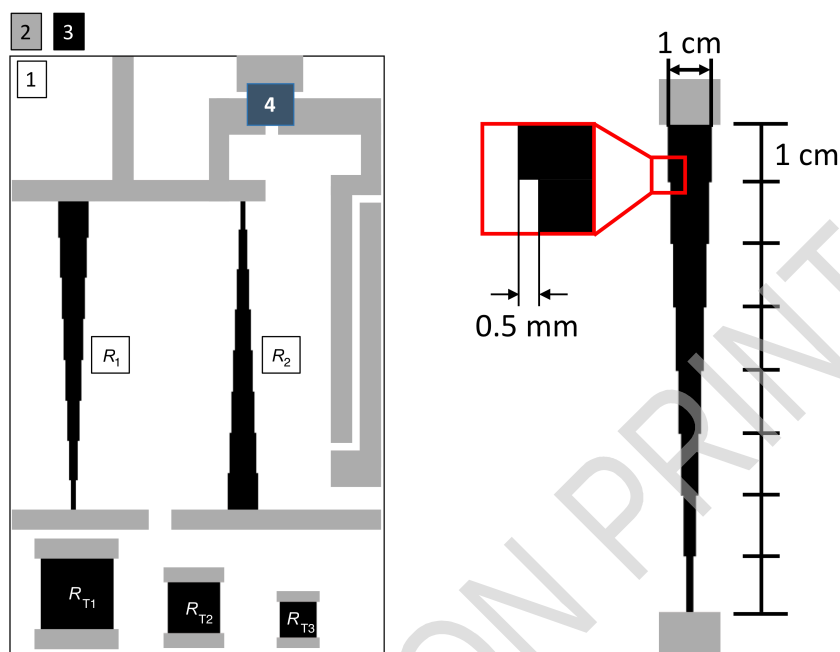
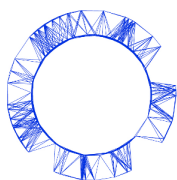
Apparatur

Det følgende apparatur (figur 3) er til rådighed:

1. multimeter
2. JFET transistor (leveret i en plastikpose med etikette)
3. 10 kabler med krokodillenæb
4. Fire *Flade* krokodillenæb (i en plastikpose)
5. Fire 1,5 V batterier
6. batteriholder
7. mini-kontaktklods med LEGO-bundplade
8. tre ledninger med små terminalstik til at forbinde til mini-sokkelbordet
9. Blyant (HB)
10. Pen med ledende sølvblæk (Circuit Scribe)
11. Stopur
12. Papir med printet kredsløb og indlejret TFT, som bruger papir som et dielektrisk lag (Figur 4)
13. Pose med skrivematerialer (1 pen, 1 blyant, 1 hviskelæder og 1 lineal)



Figur 3. Apparatur.

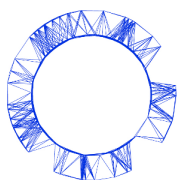


Figur 4. Venstre: Papirark med printet kredsløb inkluderet i apparaturet: Papir (1), ledende sølvspor (2), kulspor med resistivitet (3), transistor af papir (4), spændingsdeler (R_1 og R_2). Højre: Geometriske dimensioner af resistanserne til spændingsdelere (bredden vokser 1,0 mm hvert trin).

Vigtigt:

Fold ikke arket med printet kredsløb og transistor for at undgå at beskadige det. Sørg for at det hele tiden er så fladt som muligt under målinger.

For følgende målinger er denne information **vigtig**:



- Multimeteret skal altid være i **DC mode**
- Multimeter skifter ikke måleområde automatisk. Du skal derfor omhyggeligt vælge et passende område til dine målinger. I tilfælde af overskridelse (*overflow*) vil displayet vise enten "1" eller "-1" og du bør skifte til et andet måleområde.
- Svagstrømsområdet er beskyttet af en 315 mA sikring. **Undgå for alt i verden at lave en kortsluttende strøm** mellem batteri og multimeter (så vil sikringen gå).
- Den indre resistans af multimeteret, når det virker som et voltmeter, er $10\text{ M}\Omega$.
- anvendt som amperemeter vil den indre resistans afhænge af området som vist i følgende tabel:

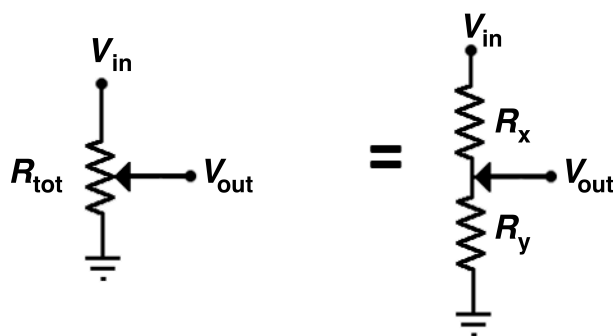
Måleområde	R_{int}/Ω
200 mA	1.0
20 mA	10
2 mA	100

Tabel 1. Indre resistans af multimeteret, anvendt som et amperemeter.

Altså, når multimeteret anvendes som et DC amperemeter, vil der være 200 mV spændingsfald ved måleområdet fulde strømstyrke. Dette gælder for alle måleområder.

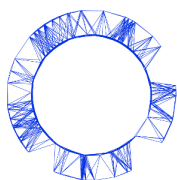
Del A. Kredsløbsdimensionering (2.5 point)

For at opnå de ønskede værdier af V_{DS} og V_{GS} , skal du bruge 2 kulresistorer printet på papir (R_1 og R_2 , se Fig. 4) og spændingsdelingskredsløbet til at tilpasse kredsløbet til et ønsket spændingsfald. R_1 og R_2 er tilsammen R_{tot} , den totale resistans af spændingsdeleren. Når man over en resistor (f.eks. R_1) benytter en konstant spænding (her ca. 3 V fra batteriet) får vi et spændingsfald på 3 V, som kan deles i to resistorer (R_x og R_y) for at få en ønsket V_{out} (Figur 5).



Figur 5. Spændingsdelerkredsløb.

Experiment



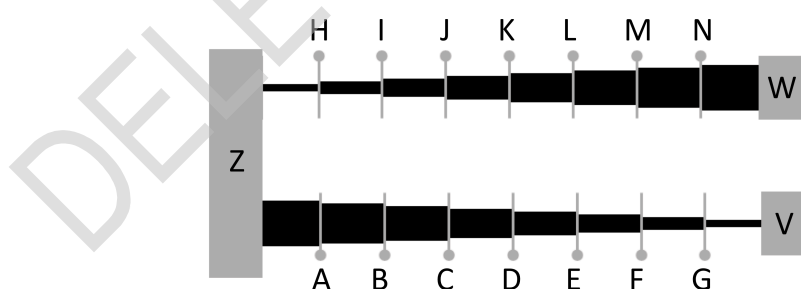
IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-7

Danish (Denmark)

A.1	Opstil udtrykket for V_{out} som funktion af V_{in} og resistanserne R_x og R_y .	0.2pt
A.2	Mål med et multimeter resistanserne af de tre testresistorer nederst på arket med kredsløbet (R_{T1} , R_{T2} og R_{T3}). Udfør et overbevisende antal målinger med forskellige positioner på sølvkontaktfladerne. Opskriv målingerne på svararket. Beregn middelværdien og vurder usikkerheden for resistansen af hver testresistor.	0.5pt
A.3	Vis at resistansen af en kvadratisk tynd film er uafhængig af sidelængden. Denne størrelsesuafhængige resistans kaldes <i>sheet resistance</i> og betegnes R_{\square} .	0.3pt
A.4	Beregn den gennemsnitlige værdi af <i>sheet resistance</i> for karbonfilmen fra målingerne i A.2 og find resistiviteten, ρ , af karbonfilmen og estimer usikkerheden. Benyt at tykkelsen, t , af karbonfilmen er $20 \pm 1 \mu\text{m}$.	0.4pt
A.5	Vis at den teoretiske værdi af resistorerne R_1 og R_2 er $R_1 = R_2 = \kappa R_{\text{square}}$, $\kappa \sim 14.2897$. Mål R_1 og R_2 og nedskriv værdierne på svararket. Bestem κ eksperimentelt og sammenlign med den teoretiske værdi.	0.5pt

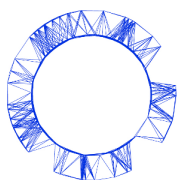
Brug sølvpenen til at tegne 7 ledende linjestykker (ved A, B, C, o.s.v.) på tværs af hver af de to resistorer, se figur 6. Disse linjestykker fungerer hver især som kontaktpunkt for spændingsdeleren.



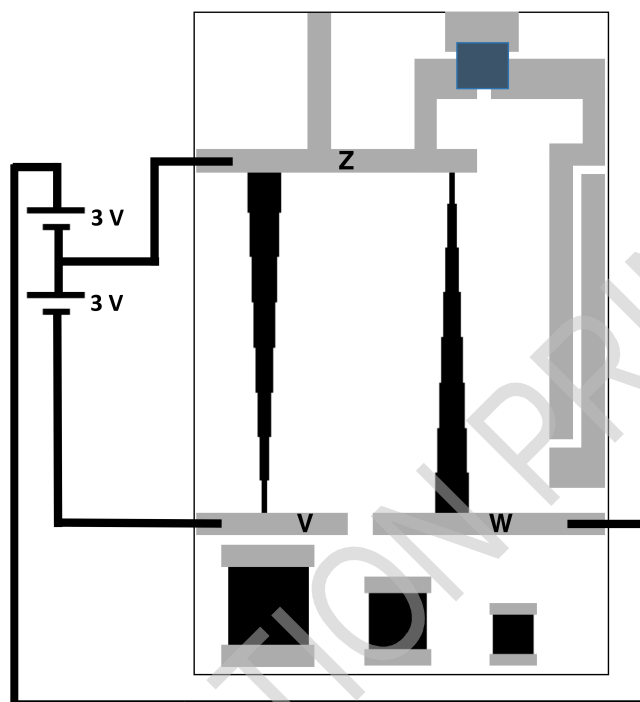
Figur 6. Eksempel på tegning af linjer og navngivning af punkter.

A.6	Mål resistanserne R_x and R_y for alle kontaktpunkter. R_x er defineret som resistansen mellem kontaktpunktet af punktet V (resistor 1) eller W (resistor 2) og R_y er defineret som resistansen mellem kontaktpunktet og punktet Z. Udfyld tabellen på svararket.	0.3pt
------------	--	-------

Indsæt de 4 AA batterier i batteriholderen. Vær omhyggelig med polariteten. Undgå at kortslutte batterierne. Forbind nu batteripakken, som vist på figur 7. Vær omhyggelig med ikke at ødelægge sølvsporene



med krokodillenæbene.



Figur 7. Batteriforbindelser

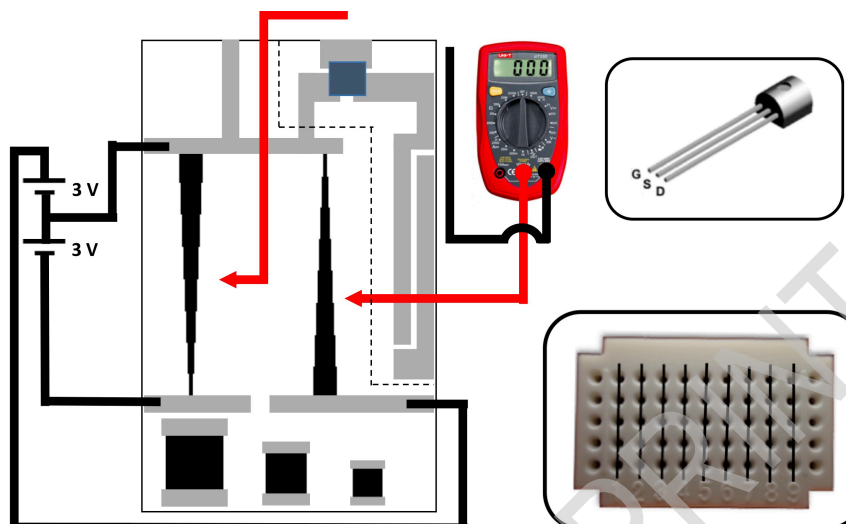
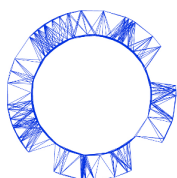
- A.7** Mål V_{out} ved hvert kontaktpunkt, idet, V_{out} betyder spændingen målt i forhold til punktet Z (som vi sætter til jord). Udfyld tabellerne på svararket. 0.3pt

Dette afslutter del A.

Del B. Karakterstikker for JFET transistoren (4.0 point)

Til målingerne på JFET transistoren anvendes kredsløbet på figur 8. Begynd med at identificere kontaktpunkterne (S, D og G) på JFET transistoren. **Identificer omhyggeligt kontaktpunkterne, idet der ikke er symmetri.** Du kan bruge mini-kontaktklodsene til at skabe forbindelser til JFET transistoren. Ledningerne med de tynde stik kan benyttes til kontaktklodsene.

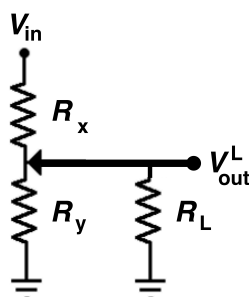
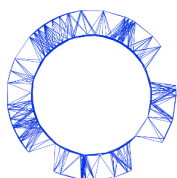
Forbind nu transistorens Gate og Source til jord (punkt Z, med potentialet 0 V) i kredsløbet. Igennem denne del skal Source for JFET altid være forbundet til jord.



Figur 8. Opstilling til bestemmelse af karakteristikkene for JFET'en. Den del af kredsløbet til højre for den stiplede linje, som inkluderer TFT'en, skal **ikke** benyttes til del B af opgaven. Øverst til højre ses hvordan man identificerer Gate, Source og Drain på JFET transistoren. Nederst til højre ses at hullerne i kontaktklodsene er forbundet sådan at alle huller i samme søjle er forbundet og at søjler er isoleret fra hinanden. Du skal selv forbinde og indstille multimeteret passende.

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.1 | Forbind Gate af transistoren til jord ($V_{GS} = 0$). Forbind så en af kablerne fra multimeteret, som skal bruges som amperemeter i DC mode, til Drain i transistoren og det andet kabel til det punkt i spændingsdelerne med det højeste potentiale. Skriv på svararket værdien af strømstyrken, I_{DS} . | 0.2pt |
| B.2 | Mål strømmen I_{DS} for forskellige valg af positive potentialer ved Drain, mens vi fortsat har $V_{GS} = 0$. Nu ændres kredsløbet så $V_{GS} < 0$ og gentag målingerne af I_{DS} som funktion af det positive spændingsfald mellem Drain og Source. Udfyld tabellen på svararket. | 0.8pt |

Når spændingsdeleren forbindes til en lav belastningsresistans vil potentialet af spændingsdeleren, V_{out}^L , være forskellig fra den nominelle værdi.



Figur 9. Spændingsdeler med en belastningsresistans R_L .

- B.3** Antag at spændingsdeleren er forbundet til en belastningsresistans R_L . Bestem korrektionsfaktoren $f = V_{out}^L / V_{out}$ som en funktion af R_L , R_x og R_y . 0.2pt

JFET transistoren har en lav output resistans når $V_{GS} = 0$, og $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$. Denne resistans øges signifikant når spændingen til Gaten polariseres negativt m.h.t. Source. For $V_{GS} < 0$ er output resistansen næsten givet ved ligning (1).

- B.4** Brug passende korrektionsfaktorer og udregn V_{DS} , spændingsfaldet mellem Drain og Source, for alle målinger i B.2. Brug i denne opgave de følgende nominelle værdier: $R_{DS}^0 = 50 \Omega$, $V_P = -1.4 \text{ V}$. 1.2pt

- B.5** Tegn graf af output kurverne $I_{DS}(V_{DS})$ for din JFET transistor. 0.5pt

- B.6** Nu undersøges transistoren for en lille værdi af V_{DS} . Find eksperimentelle værdier af R_{DS} for din JFET of forskellige værdier af V_{GS} , og plot data. 0.5pt

- B.7** Plot I_{DS} som funktion af V_{GS} (transferkurve) for din JFET transistor for $V_{DS} \sim +3 \text{ V}$. 0.3pt

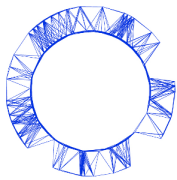
Når JFET er i mætningstilstand vil strømmen I_{DS} kunne beskrives ved ligning (2).

- B.8** Bestem ud fra måledata I_{DSS} og *pinch-off voltage*, V_P , for din JFET. Sammenlign med din værdi af V_P med den nominelle værdi. 0.4pt

En vigtig størrelse ved en JFET transistor (specielt hvis anvendt i forstærker) er den såkaldte transistor transconductance, g , defineret som

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

For en funktion af to variable $f(x, y)$ betyder $\frac{\partial f}{\partial x}$ den afledte af f m.h.t. x når y holdes konstant.



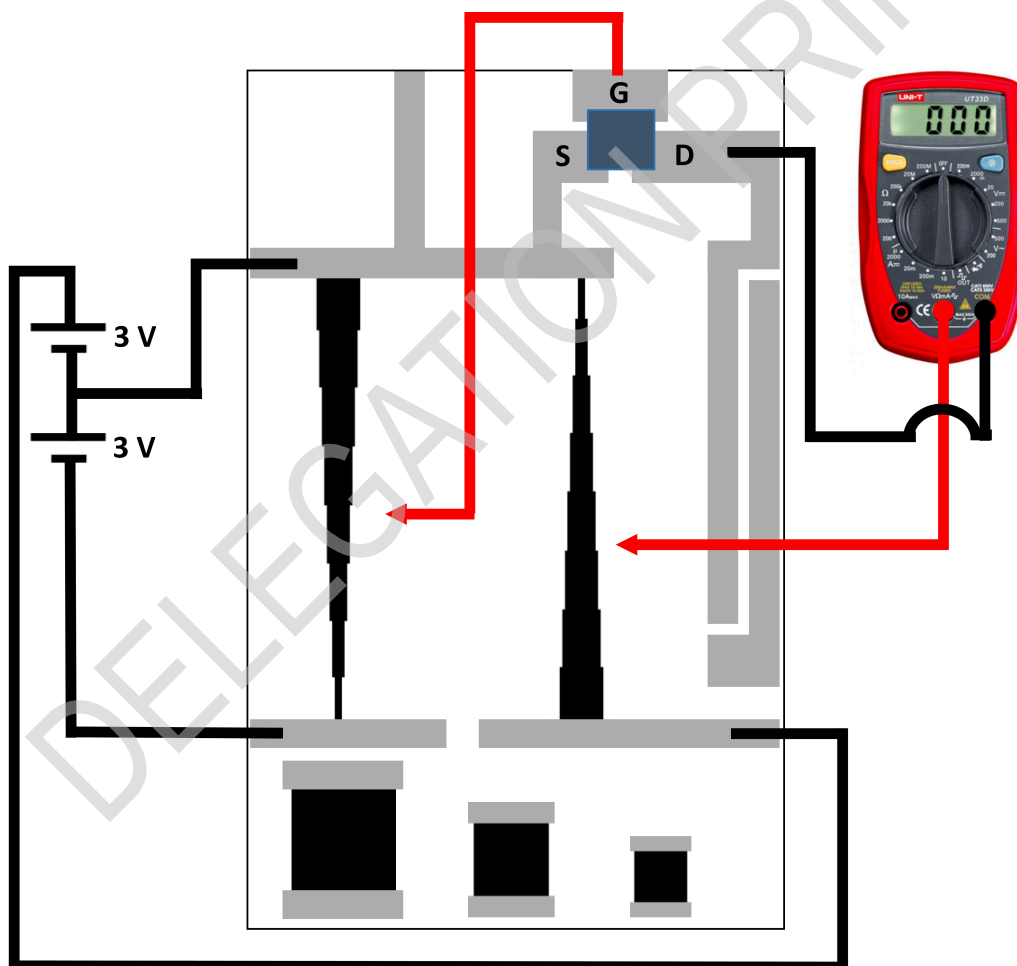
- B.9** Bestem ud fra din transferkurve transconductancen når $V_{GS} = -0.50$ V. Sammenlign med den beregnede værdi ved anvendelse af ligning (2).

0.4pt

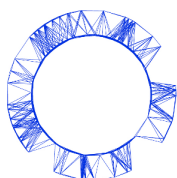
Del C. Papirtransistor (2.0 point)

Denne opgave omhandler papirtransistoren TFT (thin film transistor), i det øverste højre hjørne af kredsløbet på arket. TFT'ens Gate, Source og Drain er markeret i figur 10.

Forbind TFT Source til jord, (punktet Z fra før), som vist på figur 10. Polariser transistoren med $V_{DS} > 0$, via en af spændingsdelerene, se figur 10. Tjek at strømmen løber gennem amperemeteret.



Figur 10. Måleopstilling til TFT. Vælg selv den korrekte indstilling af amperemeterets måleområde og tilslutning.



C.1 Anvend $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$. Luk transistoren ved at tilføje $V_{GS} = -3.0 \text{ V}$. Vent 1 min. 0.8pt
på at transistoren lukker. Nedskriv på svararket værdien af strømmen, I_{closed} .
Åben transistoren ved at sætte $V_{GS} = 0$, samtidig med at du fastholder $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$. Mål strømmen som funktion af tiden, startende fra det øjeblik, hvor du åbner transistoren. Fortsæt mindst 5 min og angiv data, $I_{DS}(t)$ på svararket.

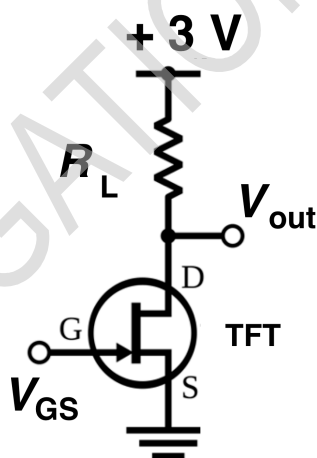
C.2 Plot $I_{DS}(t)$. Det er en sum af to eksponentielle processer, den ene med en betydeligt større tidskonstant (τ_2) end den anden (τ_1). bestem den mindste tidskonstant, τ_1 . 1.2pt

Del D. Inverterende kredsløb (1.0 point)

Et kredsløb er inverterende, hvis en høj værdi af V_{in} giver en lav værdi af V_{out} og omvendt.

Her anvendes igen en transistor, som på figur 11. I dette tilfælde er $V_{in} = V_{GS}$ og V_{out} er spændingen målt ved Drain (D).

Følgelig vil vi undersøge hvad der sker med V_{out} , når vi lader V_{GS} gå fra -3 V til 0 V .

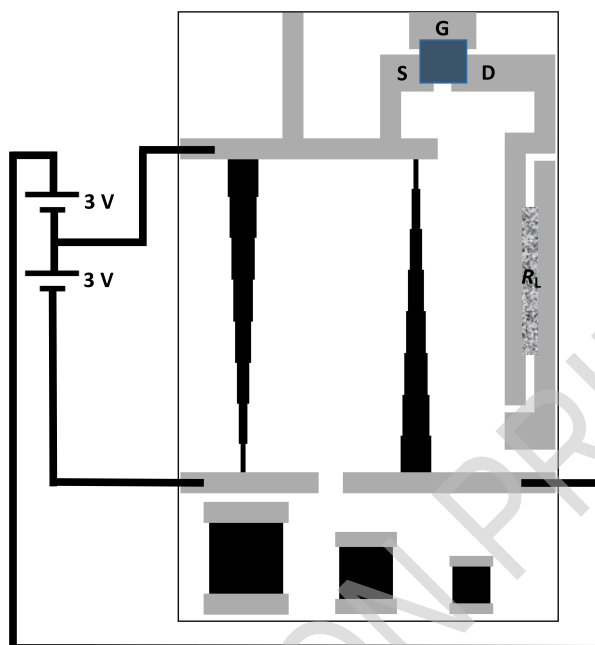
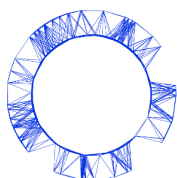


Figur 11. Inverterende kredsløb.

I opstillingen på figur 11 er transistoren TFT'en og R_L er en belastningsresistans, som du skal tilføje manuelt ved at forbinde Drain med V_{in} kontakten med en blyantsstreg, som vist i figur 12.

Når du tegner på arket med blyant kan stregen lede strøm med en vis resistans. Hvis du lave stregen tyk mindskes resistansen. Tegn så resistansen bliver $R_L = 200 \text{ k}\Omega$. Hold løbende øje med resistansen. Du kan øje resistansen ved brug af viskelæder.

Du skal ramme en værdi af R_L med en afvigelse på højst 10 procent fra den ønskede.



Figur 12. Ufuldstændig opstilling for det inverterende kredsløb

Tilføj $R_L \simeq 200 \text{ k}\Omega$ med blyantsstreg, se figur 12.

D.1 Angiv din værdi af R_L på svararket. 0.5pt
 Opstil det inverterende kredsløb (figur 12). Før du laver målinger, skal du lukke transistoren ved at anvende $V_{GS} = -3 \text{ V}$ og vente ca. 1 min.
 Mål derpå V_{out} mens du forøger V_{GS} fra -3 V til 0 V og foretag aflæsninger af V_{out} når den har stabiliseret sig (efter op til 100 s). Anfør de målte værdier på svararket.

D.2 Plot $V_{out}(V_{in})$, spændingstransferkurven, og tegn en blød tendenskurve. 0.5pt