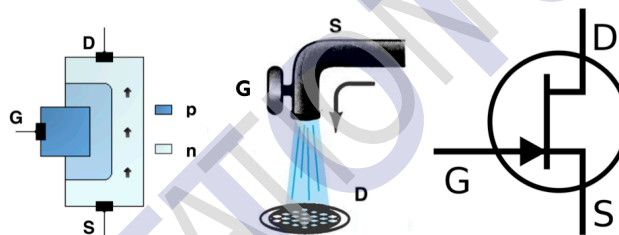


Τρανζίστορ από χαρτί (10 μονάδες)

Η τεχνολογία ηλεκτρονικών στη σύγχρονη κοινωνία βασίζεται εξ ολοκλήρου σε μια απλή αλλά πολύ ισχυρή διάταξη: το τρανζίστορ, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως διακόπτης είτε ως ενισχυτής. Κατά τη χρήση του ως διακόπτης λειτουργεί ως μονάδα αποθήκευσης ή επεξεργασίας της πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή.

Εδώ θα αναλύσουμε δύο τύπους των Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (Field Effect Transistor ή FET): τα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Επαφής (Junction Field Effect Transistor ή JFET) και το Τρανζίστορ Λεπτού Φιλμ (Thin Film Transistor ή TFT).

Ακολουθώντας θα περιγράψουμε απλοποιημένα τον τρόπο λειτουργίας ενός FET. Ένα FET είναι μια μη γραμμική διάταξη τριών ακροδεκτών (που ονομάζονται Πύλη-Gate: G, Πηγή-Source: S, and Καταβόθρα / Απαγωγός-Drain: D) που ελέγχει τη ροή ρεύματος μεταξύ Πηγής και Απαγωγού, επιδρώντας στη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στην Πύλη. Σε μια απλή, και βέβαια όχι εντελώς ορθή αναλογία, ένα FET λειτουργεί παρόμοια με μια βρύση, με το διακόπτη να παίζει το ρόλο της Πύλης που ελέγχει τη ροή του νερού.



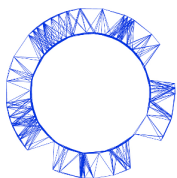
Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση ενός JFET n-καναλιού (αριστερά), του υδραυλικού ανάλογου (μέσο) και του κυκλωματικού συμβολισμού (δεξιά). Τα βέλη στο σχήμα του JFET υποδηλώνουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ Πηγής (S) and Απαγωγού (D) διαμέσου του στενού n-καναλιού. Το πλάτος του καναλιού εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ Πύλης (G) και Πηγής (S).

Το JFET βασίζεται στις ιδιότητες της Επαφής (Junction) μεταξύ δύο τύπων ημιαγωγικών υλικών, π.χ. πυριτίου με προσμίξεις τύπου p και τύπου n, εξ ου και το όνομά του. Το JFET έχει ένα στενό κανάλι, μέσω του οποίου κυκλοφορεί το ρεύμα Πηγής-Απαγωγού. Σε ένα FET n-καναλιού το κανάλι έχει κατασκευαστεί από ημιαγωγό τύπου n. Το πλάτος του καναλιού ελέγχεται επακριβώς εφαρμόζοντας μια **αρνητική** τάση μεταξύ Πύλης και Πηγής, $V_{GS} = V_G - V_S$. Γενικά για σταθερή τάση V_{GS} , το ρεύμα μεταξύ Πηγής και Απαγωγού εξαρτάται κατά μη γραμμικό τρόπο από την εφαρμοζόμενη τάση μεταξύ Απαγωγού και Πηγής, $V_{DS} = V_D - V_S$. Όμως για μικρές τιμές της V_{DS} , το ρεύμα εξαρτάται γραμμικά από την εφαρμοζόμενη τάση, συνεπώς το JFET παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά. Πάντως η αντίσταση εξόδου, $R_{DS} = V_{DS}/I_{DS}$, εξαρτάται ισχυρά από την εφαρμοζόμενη τάση V_{GS} , με βάση τη σχέση:

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

όπου R_{DS}^0 είναι η αντίσταση εξόδου σε τάση $V_{GS} = 0$ και $V_P < 0$ είναι η παράμετρος του JFET που ονομάζεται *τάση αποκοπής*. Προφανώς, στην τάση αποκοπής το FET δεν επιτρέπει τη ροή ρεύματος.

Για οποιεσδήποτε σταθερές τιμές $V_{GS} > V_P$, το ρεύμα μεταξύ Πηγής και Απαγωγού θα αποκλίνει από τη γραμμική συμπεριφορά με την αύξηση της V_{DS} , και κάποια στιγμή θα αποκτήσει μια σχεδόν σταθερή



τιμή κόρου. Έστω I_{DSS} η ένταση του ρεύματος κόρου για $V_{GS} = 0$. Στις συνθήκες αυτές (μεγάλη τιμή V_{DS}), το ρεύμα κόρου θα εξαρτάται μόνο από την V_{GS} όπως περιγράφει η σχέση:

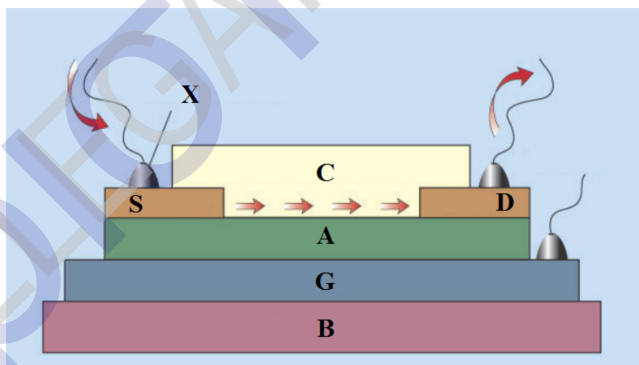
$$I_{DS} = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$

Δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του JFET θα πρέπει να τονιστούν. Αν και η ελεγχόμενη από τάση αντίσταση εξόδου μπορεί να είναι πολύ μικρή, η αντίσταση εισόδου ($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$) παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, συνήθως μεγαλύτερες από $10^9 \Omega$, δηλ. στη διάταξη εισέρχεται ένα πολύ μικρό ρεύμα. Επίσης η χωρητικότητα ενός μικρού JFET είναι αρκετά μικρή, καθιστώντας το μια συσκευή γρήγορης απόκρισης που μπορεί να 'ανοιγοκλείνει' με συχνότητα τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από MHz.

Ακολουθώς θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας ενός διαφορετικού FET, του TFT.

Όπως κάθε άλλο FET, το TFT επιτρέπει τον έλεγχο του ρεύματος μεταξύ δύο επαφών, των ηλεκτροδίων του Απαγωγού και της Πηγής, μέσω της εφαρμογής τάσης σε ένα τρίτο ηλεκτρόδιο, την Πύλη.

Το ηλεκτρόδιο της Πύλης διαχωρίζεται από την ημιαγωγική στρώση μέσω διηλεκτρικού το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία ενός κατακόρυφου ηλεκτρικού πεδίου που θα ελέγχει τους ελεύθερους φορείς φορτίου του ημιαγωγού (επίδραση πεδίου). Η στρώση διηλεκτρικού μπορεί να αντικατασταθεί από μια ηλεκτρολυτική μεμβράνη, για παράδειγμα φύλλο χαρτιού, όπου υπάρχουν ευκίνητα ιόντα (βλ. Εικόνα 2) και στην περίπτωση αυτή η τάση που εφαρμόζεται στην Πύλη θα ωθήσει τα ιόντα αντίθετου φορτίου στην ημιαγωγική επιφάνεια, δημιουργώντας μια περιοχή φορτίου ιόντων που θα διαμορφώσει την πυκνότητα των ελεύθερων φορέων που υπάρχουν στον ημιαγωγό (Electrolyte Gated Transistors - EGTs). Ερευνητές του Πανεπιστημίου Nova, της Λισσαβώνας, ήταν πρωτοπόροι στην ανάπτυξη του τρανζίστορ σε χαρτί το 2008, και ηγούνται παγκοσμίως σε αυτό το ερευνητικό πεδίο.



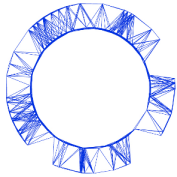
Εικόνα 2. Σχήμα του TFT σε χαρτί που χρησιμοποιείται σε αυτό το πείραμα. S - Πηγή, D - Απαγωγός, G - Πύλη, A - χαρτί (διηλεκτρικό), B - υπόστρωμα, C - στρώση ημιαγωγού (Οξειδιο Ψευδαργύρου με προσμίξεις Γάλλιου και Ίνδιου, Gallium-Indium-Zinc oxide ή GIZO), X - Μεταλλικές επαφές. Τα βέλη υποδεικνύουν τη φορά του ρεύματος.

Αντίστοιχα προς το JFETs, τα TFT μπορούν να λειτουργούν σε δύο βασικές παραλλαγές, μία γραμμική και μία κόρου. Σε αντίθεση προς το JFET, η ενδογενής χωρητικότητα του TFT είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με την απόδοση της διάταξης.

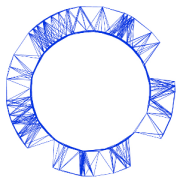
Σε αυτό το πείραμα, θα εξετάσετε πως λειτουργούν ένα JFET n-καναλιού και TFT σε χαρτί.

Θα προσδιορίσετε τις Χαρακτηριστικές Καμπύλες (Characteristic Curves ή CCs) αυτών των διατάξεων, μετρώντας το ρεύμα μεταξύ Πηγής S και Απαγωγού D (I_{DS}) κατά την εφαρμογή τάσεων στην Πύλη G (V_{GS}) και στον Απαγωγό D (V_{DS}).

Οι δύο σημαντικότερες CCs είναι η Χαρακτηριστική Εξόδου κι η Χαρακτηριστική Μεταφοράς:



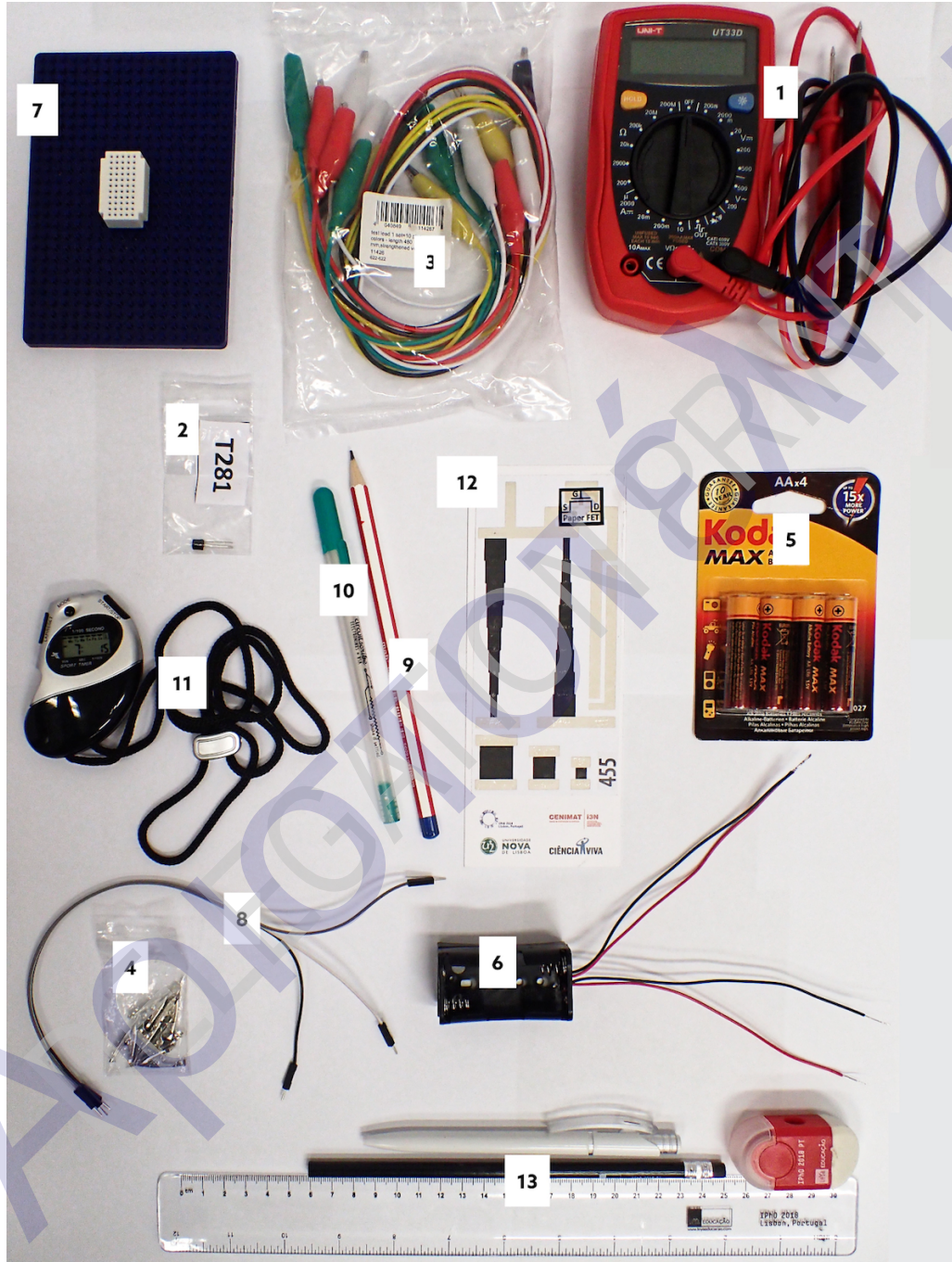
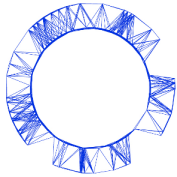
- **Χαρακτηριστική Εξόδου:** Για την καμπύλη αυτή το ρεύμα μεταξύ Πηγής και Απαγωγού (I_{DS}) μετριέται και σχεδιάζεται ως συνάρτηση της τάσης μεταξύ Πηγής και Απαγωγού (V_{DS}), όπου η V_{DS} μεταβάλλεται από 0V μέχρι +3 V, σε βήματα, διατηρώντας τη V_{GS} σταθερή
- **Χαρακτηριστική Μεταφοράς:** Για την καμπύλη αυτή το I_{DS} μετριέται και σχεδιάζεται σε συνάρτηση με τη V_{GS} . Η V_{DS} διατηρείται σταθερή σε κατάλληλη τιμή, ώστε το τρανζίστορ να λειτουργεί στην **περιοχή κόρου** και η V_{GS} θα μεταβάλλεται, σε βήματα, με τιμές από -3 μέχρι 0 V.



Εξοπλισμός

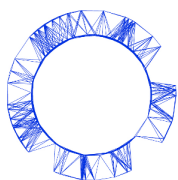
Ο εξοπλισμός που σας δίνεται για την πειραματική διάταξη και διαδικασία (Εικόνα 3) αποτελείται από :

1. πολύμετρο
2. JFET τρανζιστορ (δίνεται μέσα σε πλαστικό σακουλάκι με αντίστοιχη ένδειξη)
3. καλώδια (10) με κροκοδειλάκια
4. επιπεδα κροκοδειλάκια (4, μέσα σε πλαστικό σακουλάκι)
5. κουτί με μπαταρίες (4×1.5 V)
6. στήριγμα μπαταρίας
7. ένα μικρό μπρέντμπορντ με στήριγμα
8. ειδικά καλώδια σύνδεσης (3) στο μπρέντμπορντ
9. ένα μολύβι HB
10. ένα μαρκαδοράκι με αγωγίμο μελάνι από ασήμι (για "γράφσιμο" κυκλώματος)
11. ένα χρονόμετρο
12. μια σελίδα χαρτί με τυπωμένα κυκλώματα και ένα ενσωματωμένο TFT που χρησιμοποιεί χαρτί σαν το διηλεκτρικό (μονωτικό) στρώμα (εικόνα 4)
13. ένα σακουλάκι με είδη γραφής (1 στυλό, 1 μολύβι, 1 γόμα/ξύστρα, 1 χάρακας)



Εικόνα 3. Εξοπλισμός.

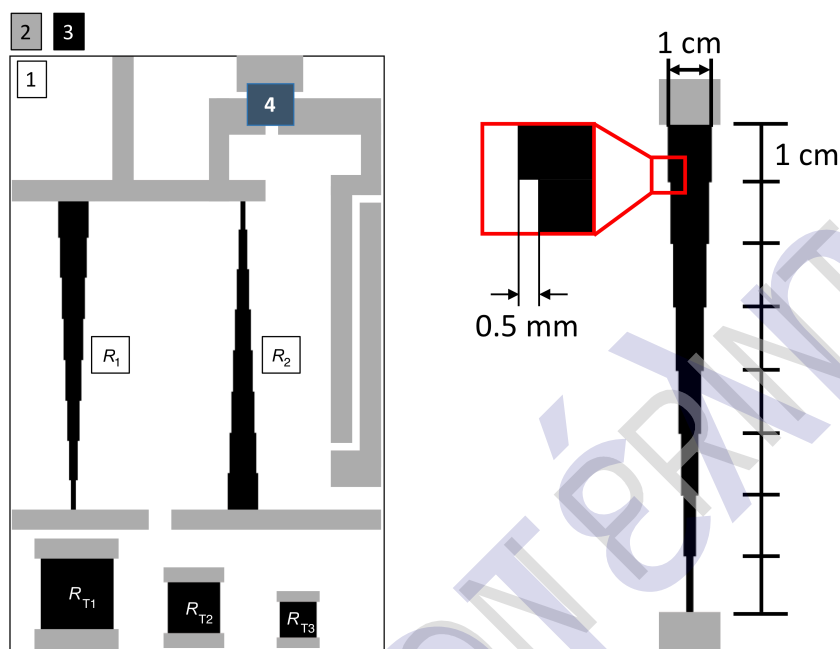
Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-6

GreekB (Greece)

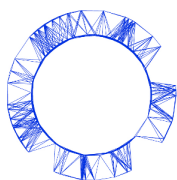


Εικόνα 4. Αριστερά: Η σελίδα χαρτί με το τυπωμένο κύκλωμα που περιλαμβάνεται στον εξοπλισμό σας : χαρτί (1) , αγωγή με το μελάνι από ασημί (2), οι γραμμές αντίστασης από άνθρακα (3), το ενσωματωμένο στο χαρτί τρανζίστορ (4), οι αντιστάσεις του διαιρέτη τάσης (R_1 και R_2). Δεξιά: Φυσικές διαστάσεις των αντιστάσεων του διαιρέτη τάσης (τα βήματα των 0.5 mm είναι σταθερά για κάθε τμήμα).

Σημαντική επισήμανση:

ΜΗ διπλώσετε/τσακίσετε το χαρτί με το κύκλωμα και το τρανζίστορ για να μην τα καταστρέψετε. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων προσπαθείστε να το διατηρήσετε όσο γίνεται πιο ίσιο (επίπεδο-ατσαλάκωτο) ώστε να έχετε καλύτερα αποτελέσματα

Για τις μετρήσεις σας **προσέξτε** τα παρακάτω **πολύ σημαντικά**:



- Για όλες τις μετρήσεις σας, το πολύμετρο πρέπει να λειτουργεί σε **ρύθμιση DC**.
- Το πολύμετρο δεν έχει αυτόματη ρύθμιση της κλίμακας τιμών των μεγεθών που μετράτε. Για τον λόγο αυτό επιλέξτε προσεκτικά την κλίμακα που είναι κατάλληλη για την μέτρηση που κάνετε. Σε περίπτωση υπέρβασης της κλίμακας που έχετε επιλέξει, θα εμφανιστεί στην οθόνη μια ένδειξη "1" ή "-1" (στα αριστερά της οθόνης), για θετικές ή αρνητικές τιμές, αντιστοίχως, οπότε θα πρέπει να κάνετε και την αναλογη αλλαγή κλιμακας.
- Για τις μετρήσεις ρευμάτων υπάρχει μια ασφαλεία 315 mA . **Αποφύγετε με κάθε τρόπο να ακουμπήσετε τους ακροδεκτες των μπαταριών με τους ακροδέκτες του πολύμετρου** όταν μετράτε ρευματα διοτι θα καεί η ασφαλεία.
- Όταν το πολύμετρο χρησιμοποιείται σαν βολτόμετρο, η εσωτερική του αντίσταση είναι 10 MΩ.
- Όταν το βολτόμετρο χρησιμοποιείται σαν αμπερόμετρο τότε η εσωτερική του αντίσταση εξαρτάται από την κλιμακα τιμών μετρησης και δίνεται στο παρακάτω πίνακα :

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

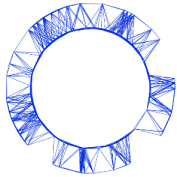
Πίνακας 1. Εσωτερική αντίσταση του πολύμετρου όταν λειτουργεί σαν αμπερόμετρο .

Ετσι, όταν το πολύμετρο λειτουργεί σαν DC αμπερόμετρο, θα υπάρχει μια πτώση τάσης 200 mV μεταξύ των ακροδεκτών του στην μέγιστη τιμή οποιασδήποτε από τις τρεις κλίμακες τιμών.

Μέρος Α. Προσδιορισμός των φυσικών παραμέτρων του κυκλώματος (2.5 βαθμοί)

Για να φτιάξετε την τάση V_{DS} (και αντιστοίχως την V_{GS}) που χρειάζεται για τη λειτουργία του τρανζίστορ, να χρησιμοποιήσετε, με τη μορφή διαιρέτη τάσης, την αντίσταση άνθρακος R_1 (και αντιστοίχως την R_2) που είναι τυπωμένη (ζωγραφισμένη) στο χαρτί, (βλέπε εικόνα 4), δηλαδή η R_1 (και αντιστοίχως η R_2) θα είναι η συνολική αντίσταση R_{tot} αυτού του διαιρέτη τάσης. Αν εφαρμόσουμε μια τάση περίπου 3V (με δύο κατά σειρά συνδεδεμένες μπαταρίες) στα άκρα της R_1 , το δυναμικό κατά μήκος της θα μειώνεται από περίπου 3V (V_{in} , ο θετικός πόλος της συστοιχίας των μπαταριών στο ένα άκρο της αντίστασης) σε 0V (στη γείωση, δηλ. στο άλλο άκρο της αντίστασης). Κάθε αντίσταση R_{tot} μπορεί να διαιρεθεί σε δυο αντιστάσεις (R_x και R_y) για να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση V_{out} (εικόνα 5).

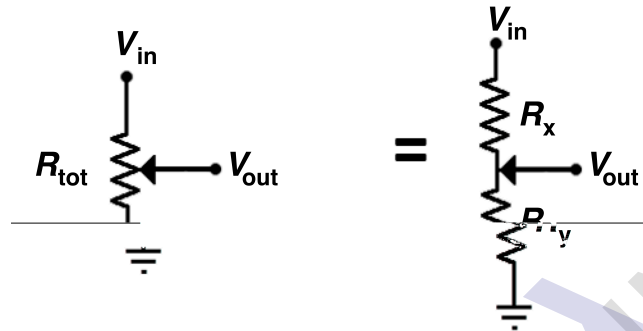
Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-8

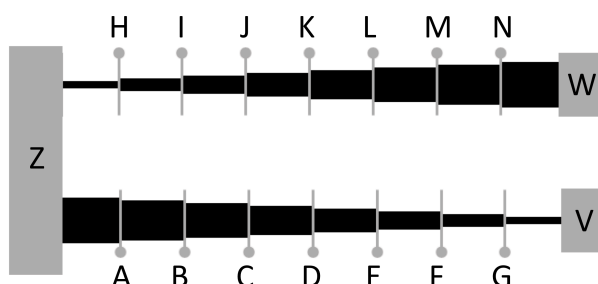
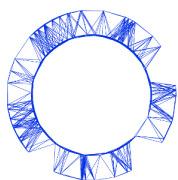
GreekB (Greece)



Εικόνα 5. Κύκλωμα διαιρέτη τάσης.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | Εκφράστε την τάση εξόδου, V_{out} , σαν συνάρτηση της τάσης V_{in} και των αντιστάσεων R_x και R_y . | 0.2pt |
| A.2 | Μετρήστε με το πολύμετρο τις τρεις αντιστάσεις (δοκιμής) στο κάτω μέρος του χαρτιού (R_{T1} , R_{T2} και R_{T3}). Να κάνετε αρκετές μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία των ασημένιων επαφών. Γράψτε όλες τις τιμές που μετράτε στη σελίδα απαντήσεων. Υπολογίστε την μέση τιμή και εκτιμήστε την αβεβαιότητα για την τιμή κάθε μιας από τις τρεις αυτές αντιστάσεις. | 0.5pt |
| A.3 | Να αποδείξετε θεωρητικά ότι η αντίσταση ενός λεπτού φιλμ σχήματος τετραγώνου είναι ανεξάρτητη του μήκους της πλευράς του. Αυτή η ανεξαρτησία διαστάσεων αντίσταση ονομάζεται <i>αντίσταση φύλλου</i> και συμβολίζεται με $R_{\square}$. | 0.3pt |
| A.4 | Να υπολογίσετε την μέση τιμή της αντίστασης φύλλου του φιλμ άνθρακα από τις μετρήσεις στο A.2 και βρείτε την ειδική αντίσταση, ρ , του φιλμ άνθρακα με μια εκτίμηση της αβεβαιότητάς της (θεωρείστε ένα πάχος t του φιλμ άνθρακα ίσο με $20 \pm 1 \mu\text{m}$). | 0.4pt |
| A.5 | Δείξτε ότι η θεωρητική τιμή των αντιστάσεων R_1 και R_2 είναι $R_1 = R_2 = \kappa R_{\square}$, $\kappa \sim 14.2897$. Μετρήστε τις R_1 και R_2 και γράψτε τις τιμές τους στο Φύλλο Απαντήσεων. Βρείτε την πειραματική τιμή του κ και συγκρίνετέ την με την θεωρητική του τιμή. | 0.5pt |

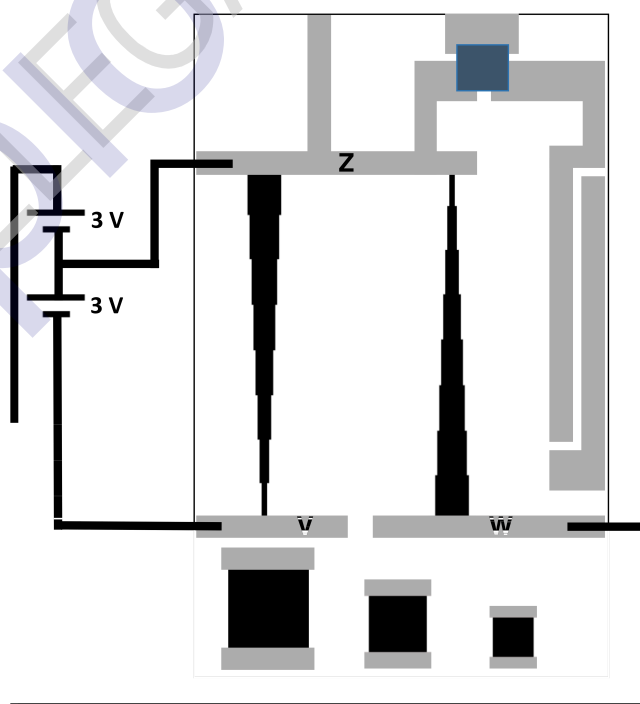
Χρησιμοποιώντας το μαρκαδόρακι με το αγώγιμο μελάνι ασημιού σχεδιάστε 7 αγώγιμες γραμμές σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους κατά μήκος των αντιστάσεων άνθρακα που υπάρχουν ήδη σχεδιασμένες στο χαρτί, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6. Αυτές οι ασημένιες γραμμές θα αποτελούν τα σημεία επαφής για τους διαιρέτες τάσης.



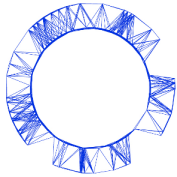
Εικόνα 6. Υπόδειγμα γραμμών και συμβολισμού τους ως σημείων επαφής.

- A.6** Μετρείστε τις τιμές αντίστασης R_x και R_y για όλα τα σημεία επαφής. Ως αντίσταση R_x ορίζεται η αντίσταση μεταξύ ενός σημείου επαφής και του σημείου V (για την αντίσταση R1) ή του σημείου W (για την αντίσταση R2), και R_y ορίζεται η αντίσταση μεταξύ ενός σημείου επαφής και του σημείου Z. Γράψτε τις τιμές που μετράτε στους διαθέσιμους πίνακες στο φύλλο απαντήσεων. 0.3pt

Βάλτε τις 4 AA μπαταρίες στη θήκη που παρέχεται. Προσέξτε τον τρόπο σύνδεσης της πολικότητάς τους και βεβαιωθείτε ότι δεν προκαλείται κάποιο βραχυκύκλωμα. Στη συνέχεια, συνδέστε την συστοιχία των μπαταριών όπως ακριβώς φαίνεται στην εικόνα 7. Επίσης προσέξτε να μην γδαρθούν οι γραμμές με το ασήμι από τα κροκοδειλάκια. Τέλος, προσέξτε ότι το κοινό σημείο ανάμεσα στα δυο ζευγη μπαταριών θα θεωρείται ως το σημείο γειώσης του συνολικού κυκλώματος (σημείο Z)



Εικόνα 7. Συνδέσεις των μπαταριών



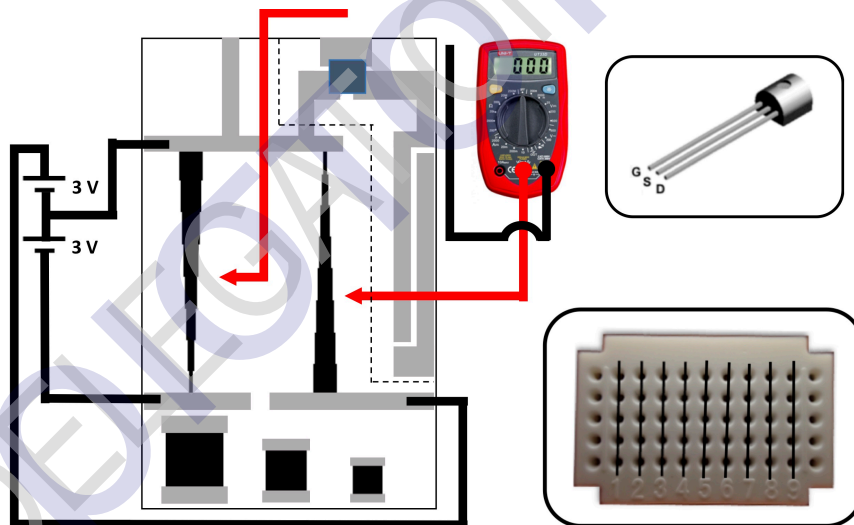
- A.7** Μετρείστε τις τιμές V_{out} σε κάθε σημείο επαφής, όπου V_{out} είναι η τάση ως προς το σημείο Z και γράψτε τις τιμές αυτές στους διαθέσιμους πίνακες του φύλλου απάντησεων. 0.3pt

Εδώ ολοκληρώθηκε το μέρος των μετρήσεων των φυσικών παραμέτρων και μπορείτε να προχωρήσετε στις μετρήσεις για τις χαρακτηριστικές καμπύλες των JFET.

Μέρος Β. Χαρακτηριστικές Καμπύλες του JFET (4.0 μονάδες)

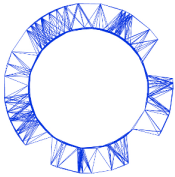
Για το χαρακτηρισμό του JFET, θα χρησιμοποιήσετε την πειραματική διάταξη της εικόνας 8. Ξεκινήστε εντοπίζοντας τις τρεις επαφές (S, D και G) στο JFET που σας δίνεται - **δώστε ιδιαίτερη προσοχή στο σωστό εντοπισμό των επαφών, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάταξη δεν είναι συμμετρική!** Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το μικρό μπρεντμπορντ για να στερεώσετε το JFET. Τα παρεχόμενα ειδικά καλώδια σύνδεσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν με το μικρό μπρεντμπορντ.

Χρησιμοποιώντας τα παρεχόμενα καλώδια, συνδέστε την Πύλη και την Πηγή του τρανζίστορ στη γείωση (σημείο Z του κυκλώματος, σε τάση 0 V). Καθόλη τη διάρκεια του μέρους αυτού η Πηγή του JFET θα πρέπει να παραμένει συνδεδεμένη στη γείωση.



Εικόνα 8. Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών του JFET. Το τμήμα του κυκλώματος στην περιοχή που οριοθετεί η διακεκομμένη γραμμή που περιλαμβάνει το TFT δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί στο Μέρος Β του πειράματος. Το άνω ένθετο περιγράφει τον τρόπο αναγνώρισης της Πύλης, της Πηγής και του Απαγωγού του JFET. Το κάτω ένθετο δείχνει τον τρόπο σύνδεσης των οπών του μικρού μπρέντμπορντ. Όλες οι οπές σε μια αριθμημένη στήλη διασυνδέονται εσωτερικά και είναι μονωμένες ως προς τις οπές άλλων στηλών. Η εικόνα του πολύμετρου είναι ενδεικτική: θα πρέπει μόνοι σας να επιλέξετε τον κατάλληλο τρόπο μετρήσεων και την κλίμακα του περιστρεφόμενου επιλογέα του πολύμετρου.

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

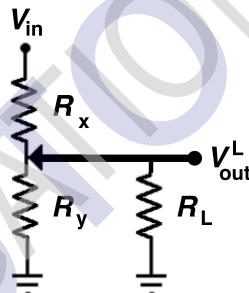
Q1-11

GreekB (Greece)

B.1 Γειώστε την Πύλη του τρανζίστορ ($V_{GS} = 0$). Ακολουθώντας συνδέστε ένα από τα καλώδια του πολύμετρου, το οποίο πρέπει να χρησιμοποιείτε στη ρύθμιση DC, στον Απαγωγό και φέρτε το άλλο καλώδιο σε επαφή με τη μέγιστη διαθέσιμη τάση του διαιρέτη τάσης. Γράψτε στο Φύλλο Απαντήσεων την τιμή του I_{DS} . 0.2pt

B.2 Μετρείστε το ρεύμα I_{DS} για δύο διαφορετικές θετικές τιμές τάσης που εφαρμόζεται στον Απαγωγό, διατηρώντας την τάση $V_{GS} = 0$. Ακολουθώντας, τροποποιήστε το κύκλωμα για να εφαρμόσετε μια αρνητική τάση μεταξύ Πηγής και Πύλης ($V_{GS} < 0$) και επαναλάβετε τις μετρήσεις του I_{DS} ως συνάρτηση της θετικής εφαρμοζόμενης τάσης μεταξύ Απαγωγού και Πηγής. Συμπληρώστε τους πίνακες του Φύλλου Απαντήσεων με τις μετρήσεις σας. 0.8pt

Όταν ο διαιρέτης τάσης συνδέεται σε χαμηλή αντίσταση φόρτου (Εικόνα 9), οι τιμές της τάσης V_{out}^L που παράγει διαφέρουν από τις ονομαστικές V_{out} που μετρούνται όταν η αντίσταση φόρτου είναι μεγάλη, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του μεγάλης αντίστασης βολτόμετρου.



Εικόνα 9. Διαιρέτης τάσης με αντίσταση φόρτου.

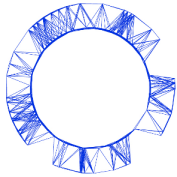
B.3 Θεωρείστε ότι ο διαιρέτης τάσης συνδέεται σε αντίσταση φόρτου R_L . Βρείτε μια έκφραση του συντελεστή διόρθωσης $f = V_{out}^L / V_{out}$ ως συνάρτηση των R_L , R_x και R_y . 0.2pt

Το JFET παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση εξόδου όταν $V_{GS} = 0$, $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$. Η αντίσταση αυτή όμως αυξάνεται σημαντικά όταν η Πύλη είναι πολωμένη αρνητικά ως προς την Πηγή. Για τιμές της $V_{GS} < 0$ η αντίσταση εξόδου περιγράφεται από την εξίσωση (1).

B.4 Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης υπολογίστε τη V_{DS} , δηλ. την πτώση τάση μεταξύ Απαγωγού και Πηγής για όλες τις μετρήσεις του ερωτήματος B.2. Χρησιμοποιήστε τα ακόλουθες ονομαστικές τιμές για το JFET που παίρνει μέρος σε αυτό το πείραμα: $R_{DS}^0 = 50 \Omega$, $V_p = -1.4 V$. 1.2pt

B.5 Σχεδιάστε τις Χαρακτηριστικές Εξόδου $I_{DS}(V_{DS})$ του JFET. 0.5pt

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-12

GreekB (Greece)

B.6 Θεωρείστε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σε μικρές τιμές τάσεις V_{DS} . Μετρήστε τις πειραματικές τιμές της R_{DS} του JFET για διάφορες τιμές της V_{GS} και σχεδιάστε την αντίστοιχη γραφική παράσταση. 0.5pt

B.7 Σχεδιάστε την Χαρακτηριστική Μεταφοράς του JFET για $V_{DS} \sim +3$ V. 0.3pt

Όταν το JFET λειτουργεί στην περιοχή κόρου το ρεύμα I_{DS} περιγράφεται από την εξίσωση (2).

B.8 Από τις μετρήσεις σας, υπολογίστε το I_{DSS} και την τάση αποκοπής V_P της διάταξής σας. Συγκρίνετε την τιμή του V_P με την ονομαστική τιμή. 0.4pt

Μια σημαντική παράμετρος του JFET, ιδίως όταν χρησιμοποιείται ως ενισχυτής, είναι η αποκαλούμενη διαγωγιμότητα, g , που ορίζεται ως

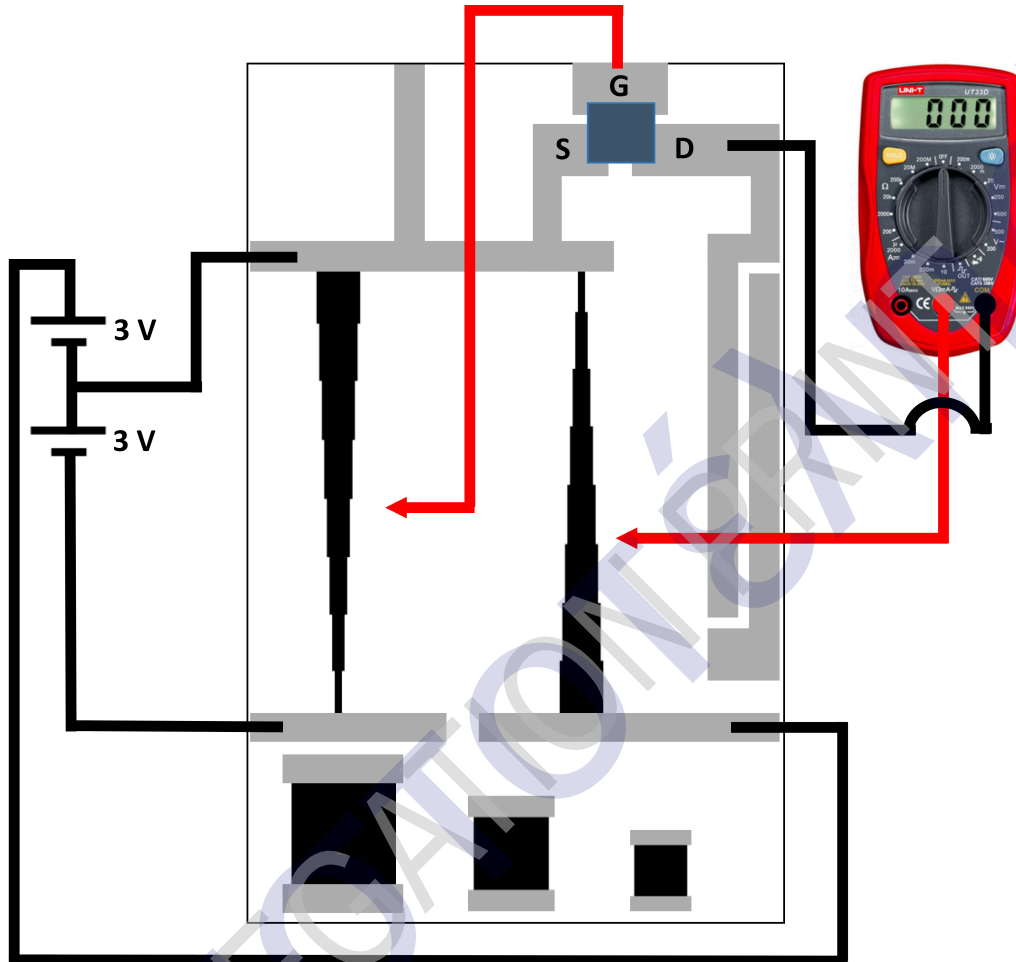
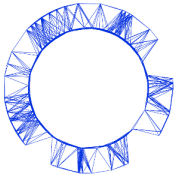
$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}. \quad (3)$$

Για μια συνάρτηση δύο μεταβλητών $f(x, y)$, ο συμβολισμός $\frac{\partial f}{\partial x}$ παριστάνει τη μερική παράγωγο της f ως προς x όταν το y διατηρείται σταθερό.

B.9 Βρείτε, από την Χαρακτηριστική Μεταφοράς, τη διαγωγιμότητα της διάταξής σας για $V_{GS} = -0.50$ V. Συγκρίνετε την τιμή αυτή με εκείνη που υπολογίζεται από την εξίσωση (2). 0.4pt

Μέρος C. Το τρανζίστορ λεπτού φιλμ σε χαρτί (2.0 μονάδες)

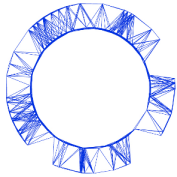
Για τα επόμενα ερωτήματα χρησιμοποιείτε το τρανζίστορ λεπτού φιλμ σε χαρτί (TFT) που βρίσκεται στην άνω γωνία του τυπωμένου κυκλώματος. Η Πύλη, η Πηγή και ο Απαγωγός του TFT σημειώνονται στην Εικόνα 10. Γειώστε την Πύλη και την Πηγή του TFT. Λάβετε υπόψη σας ότι σε αυτό το μέρος του πειράματος, η Πηγή πρέπει να είναι μόνιμα συνδεδεμένη στον κοινό ακροδέκτη της συστοιχίας μπαταριών, δηλ. σε 0 V, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Πολώστε το τρανζίστορ με $V_{DS} > 0$, μέσω ενός από τους διαθέσιμους διαιρέτες τάσης (Εικόνα 10). Ελέγξτε ότι το αμπερόμετρο διαρρέεται από ρεύμα.



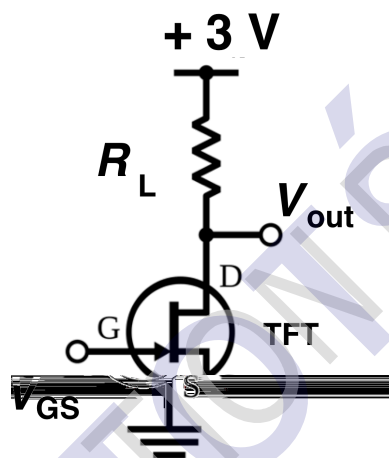
Εικόνα 10. Πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις με το TFT σε χαρτί. Η εικόνα του πολύμετρου είναι ενδεικτική: θα πρέπει μόνοι σας να επιλέξετε τον κατάλληλο τρόπο μέτρησης και την κλίμακα του στρεφόμενου επιλογέα του πολύμετρου.

C.1 Εφαρμόστε τάση $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$. Κλείστε το τρανζίστορ εφαρμόζοντας τάση $V_{GS} = -3.0 \text{ V}$. Περιμένετε για 1 min ώστε να κλείσει το τρανζίστορ. Στο Φύλλο Απαντήσεων γράψτε την απομένουσα ένταση ρεύματος I_{closed} . Ακολουθώς ανοίξτε το τρανζίστορ θέτοντας $V_{GS} = 0$, ενώ διατηρείτε την $V_{DS} = +3.0 \text{ V}$. Μετρήστε το ρεύμα ως συνάρτηση του χρόνου, ξεκινώντας από τη στιγμή που ανοίγετε το τρανζίστορ, για τουλάχιστον 5 min και καταγράψτε τις μετρήσεις του $I_{DS}(t)$ στο Φύλλο Απαντήσεων. 0.8pt

C.2 Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση $I_{DS}(t)$ και δείξτε ότι η καμπύλη είναι παρόμοια με εκείνη που προκύπτει από τη φάση φόρτισης δύο κυκλωμάτων RC συνδεδεμένων παράλληλα, το ένα με πολύ μεγαλύτερη σταθερά χρόνου (τ_2) ως προς το άλλο (τ_1). Προσδιορίστε τη μικρότερη σταθερά χρόνου τ_1 . 1.2pt

**Μέρος D. Κύκλωμα αντιστροφής (1.5 μονάδες)**

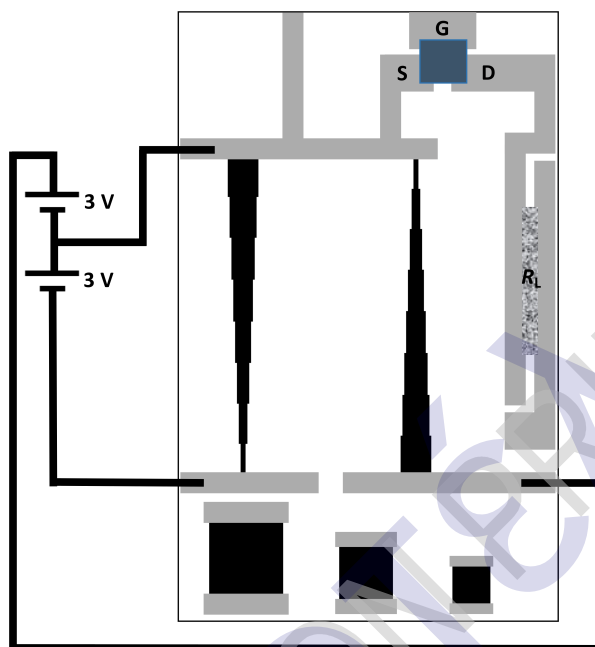
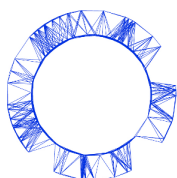
Ένα από τα πιο σημαντικά κυκλώματα μικροηλεκτρονικής είναι ο αντιστροφέας, ο οποίος αντιστρέφει μια ψηφιακή είσοδο. Για παράδειγμα αν $V_{in} = \text{high}$, τότε $V_{out} = \text{low}$, και αντιστρόφως. Στην καρδιά ενός τέτοιου κυκλώματος βρίσκουμε για άλλη μια φορά το τρανζίστορ και μια από τις απλούστερες υλοποιήσεις είναι ο αποκαλούμενος ενισχυτής κοινής Πηγής, που εικονίζεται στην Εικόνα 11, χρησιμοποιώντας ένα τρανζίστορ και μία αντίσταση φόρτου (R_L). Στην περίπτωση αυτή ισχύει $V_{in} = V_{GS}$ και V_{out} είναι η τάση που μετρείται στο ηλεκτρόδιο του Απαγωγού. Έτσι, στο Μέρος αυτό θα καταγράψουμε τη μεταβολή της V_{out} για τιμές της V_{GS} από -3V ως 0V .



Εικόνα 11. Ενισχυτής κοινής Πηγής και κύκλωμα αντιστροφής.

Στην πειραματική διάταξη της Εικόνας 11 το τρανζίστορ είναι το TFT σε χαρτί και η R_L είναι η αντίσταση φόρτου που θα προσθέσετε κυριολεκτικά με το χέρι, χρησιμοποιώντας το μολύβι για να σχεδιάσετε τη σύνδεση του ακροδέκτη του Απαγωγού στην επαφή V_{in} , όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Καθώς σχεδιάζετε, στην πραγματικότητα αποθέτετε στο χαρτί λεπτές στρώσεις αγωγίμου γραφίτη, συνεπώς όσο περισσότερες στρώσεις τοποθετείτε τη μία πάνω στην άλλη, τόσο μικρότερη η αντίσταση που προκύπτει. Κατά τη σχεδίαση της R_L εξασφαλίστε ότι καταγράφετε συνεχώς την τιμή της. Προκειμένου η V_{out} να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο την τιμή 0V η αντίσταση φόρτου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι, καθώς σχεδιάζετε την αντίσταση προσπαθήστε να πετύχετε μια τιμή κοντά στην επιθυμητή $R_L = 200\text{ k}\Omega$.

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε είτε το μολύβι για να μειώσετε την τιμή της R_L ή τη γόμα για να την αυξήσετε. Θα πρέπει να προσπαθήσετε να καταλήξετε σε μια τιμή που διαφέρει όχι περισσότερο από 10% από την επιθυμητή τιμή.

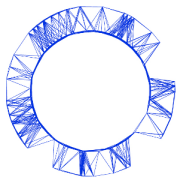


Εικόνα 12. Πειραματική διάταξη για τον αντιστροφέα / ενισχυτή κοινής Πηγής.

Χρησιμοποιήστε το διαθέσιμο μολύβι HB και σχεδιάστε με το χέρι μία αντίσταση άνθρακα με τιμή $R_L \approx 200 \text{ k}\Omega$ που θα χρησιμοποιήσετε ως αντίσταση φόρτου του TFT σε χαρτί για να κατασκευάσετε τον αντιστροφέα (βλ. Εικόνα 12).

- | | | |
|------------|--|-------|
| D.1 | Σημειώστε στο Φύλλο Απαντήσεων τη μετρηθείσα τιμή της R_L . Κατασκευάστε το κύκλωμα αντιστροφής (Εικόνα 12) χρησιμοποιώντας τη σχεδιασμένη αντίσταση άνθρακα και το TFT σε χαρτί. Πριν τη διενέργεια μετρήσεων, θυμηθείτε ότι πρέπει να κλείσετε τελείως το τρανζίστορ εφαρμόζοντας τάση $V_{GS} = -3 \text{ V}$ και περιμένοντας για $\sim 1 \text{ min}$. Ακολουθώντας μετρήστε τη V_{out} καθώς μεταβάλλετε τη V_{GS} από -3 V ως 0 V και μετράτε τη V_{out} μετά την παρέλευση του απαιτούμενου χρόνου σταθεροποίησης της τιμής της, ίσο κατά μέγιστο προς 100 s . Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στο Φύλλο Απαντήσεων. | 0.5pt |
| D.2 | Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση $V_{out}(V_{in})$ της Χαρακτηριστικής Μεταφοράς Τάσης και σχεδιάστε μια ομαλή Γραμμή Τάσης διαμέσου των σημείων που αντιστοιχούν στις μετρήσεις σας. | 0.5pt |

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-1

Greek (Greece)

Γράψτε τους αριθμούς από 0 έως 9 στον παρακάτω πίνακα:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Μέρος A: Προσδιορισμός των φυσικών παραμέτρων του κυκλώματος (2.5 points)

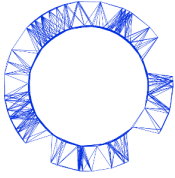
A.1 (0.2 pt)

$V_{\text{out}} =$

A.2 (0.5 pt)

#	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}
σ_R			

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-2

Greek (Greece)

A.3 (0.3 pt)

Επίδειξη:

A.4 (0.4 pt)

$$R_{\square} = \quad \pm$$

$$\rho_{\text{Carbon film}} = \quad \pm$$

A.5 (0.5 pt)

Επίδειξη:

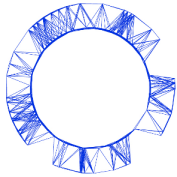
Τιμές μέτρησης:

$$R_1 =$$

$$R_2 =$$

$$\kappa =$$

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-3

Greek (Greece)

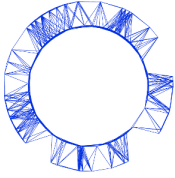
A.6 (0.3 pt)

R_1 Σημεία	R_x	R_y	R_2 Σημεία	R_x	R_y
Z			Z		
A			H		
B			I		
C			J		
D			K		
E			L		
F			M		
G			N		
V			W		

A.7 (0.3 pt)

Σημεία	V_{out}	Σημεία	V_{out}
A		H	
B		I	
C		J	
D		K	
E		L	
F		M	
G		N	
V		W	

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

A1-4

Greek (Greece)

Μέρος Β: Χαρακτηριστικές καμπύλες JFET (4.5 μονάδες)

B.1 (0.2 pt)

$I_{DS} =$

B.2 (0.8 pt)

τιμές ρεύματος I_{DS} :

Πύλη/ Απαγωγός	Z	H	I	J	K	L	M	N	W
Z									
A									
B									
C									
D									
E									
F									
G									
V									

B.3 (0.2 pt)

$f =$

A1-5

[illegible]

A1-6
Greek (Greece)

Greek (Greece)

Πύλη C: $V_{GS} =$

$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]

Πύλη D: $V_{GS} =$

$$R_{DS} =$$
[illegible]

A1-7
Greek (Greece)

Greek (Greece)

Πύλη Ε: $V_{GS} =$

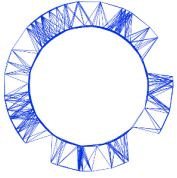
$$R_{\text{DS}} =$$
[illegible]

Πύλη F: $V_{GS} =$

$$R_{DS} =$$
[illegible]

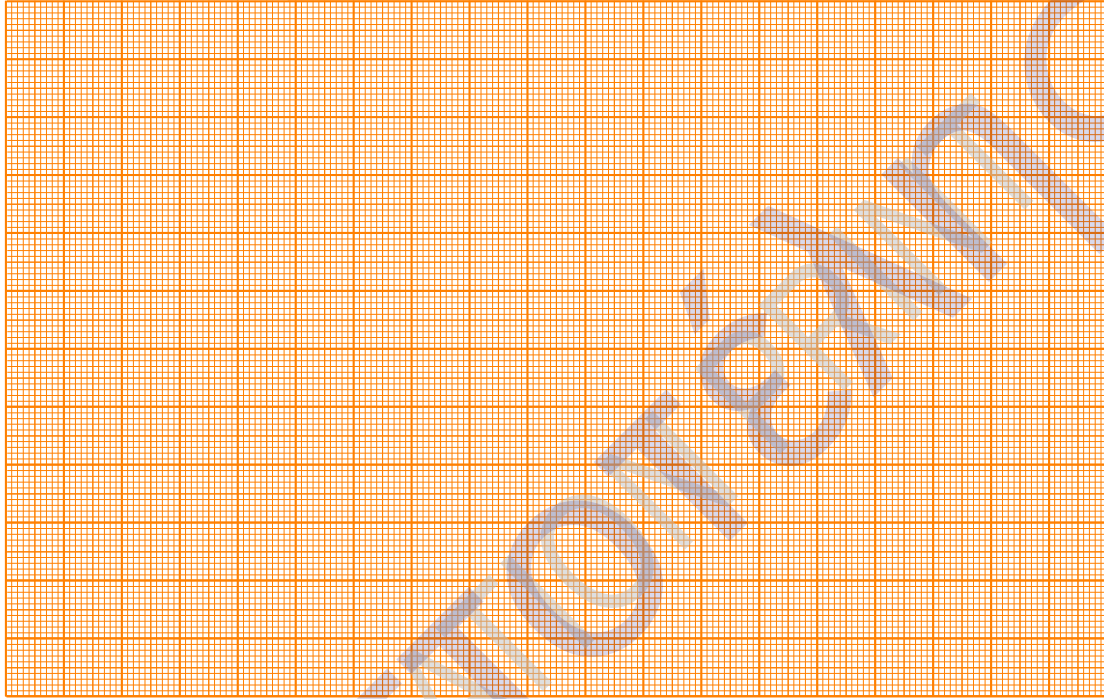
A1-8

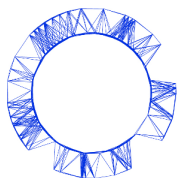
[illegible]



B.5 (0.5 pt)

Καμπύλες εξόδου:

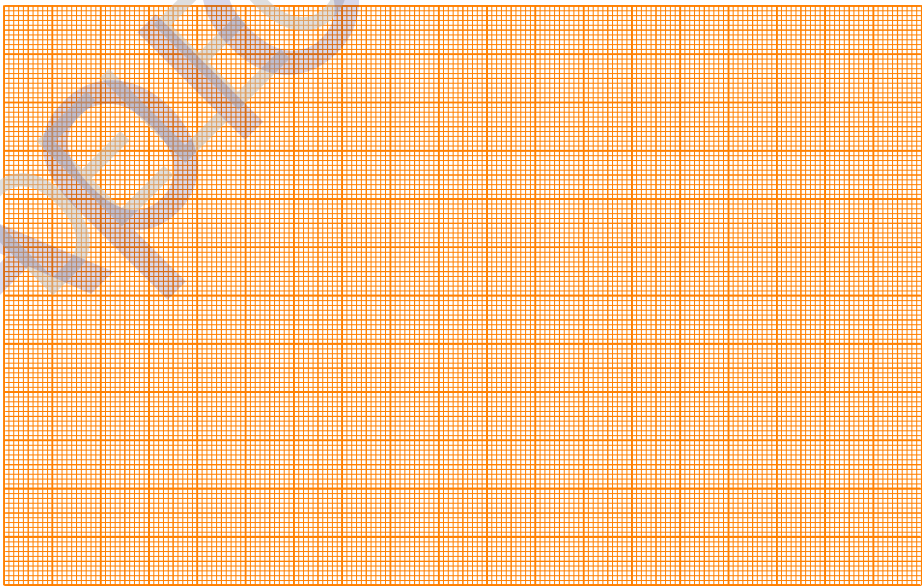


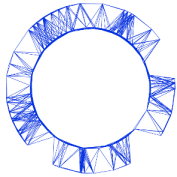


B.6 (0.5 pt)

V_{GS}	R_{DS}

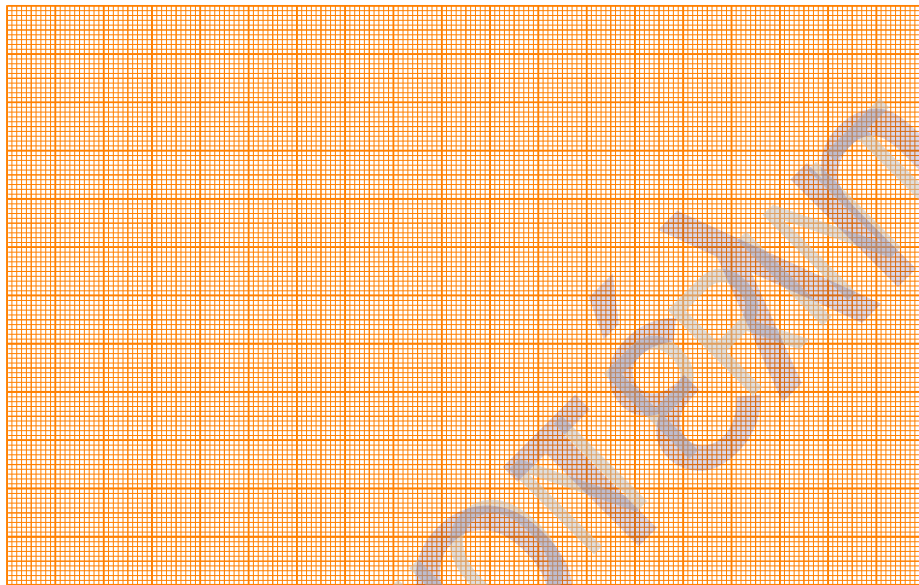
Γραφική παράσταση: $R_{DS}(V_{GS})$





B.7 (0.3 pt)

Χαρακτηριστική καμπύλη:



B.8 (0.4 pt)

$I_{DSS} =$

$V_p =$

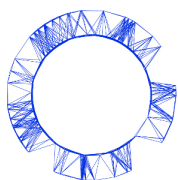
B.9 (0.4 pt)

Τιμή μέτρησης διαγωγιμότητας: $g =$

τιμή υπολογισμού της διαγωγιμότητας απο το μοντελο του JFET : $g =$

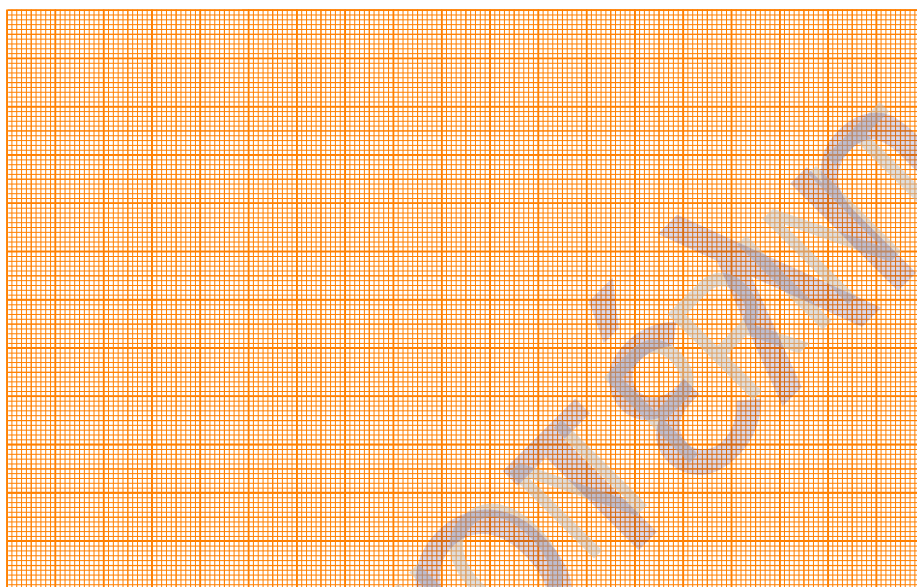
A1-12

[illegible]

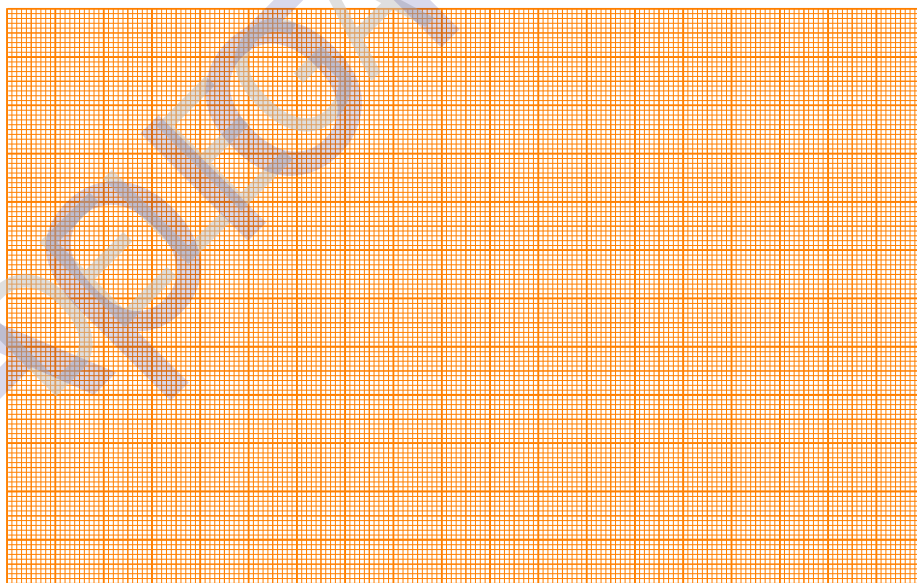


C.2 (1.2 pt)

Γραφική παράσταση: $I_{DS}(t)$



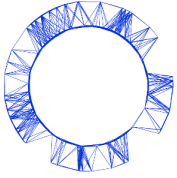
Βοηθητικό γραφικό για την εύρεση τ_1 :



$$\tau_1 =$$

A1-14

$$R_{\mathrm{L}} =$$
[illegible]



D.2 (0.5 pt)

Γραφική παράσταση: $V_{\text{out}}(V_{\text{in}})$

