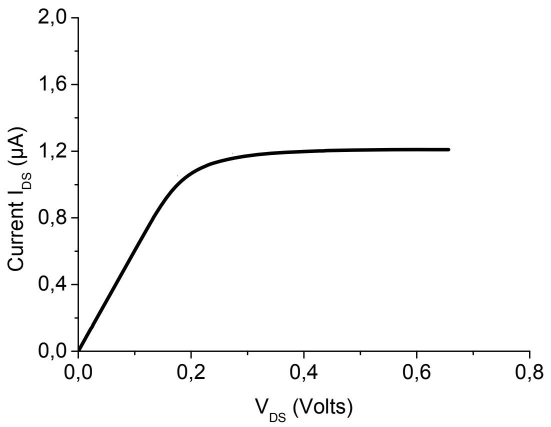
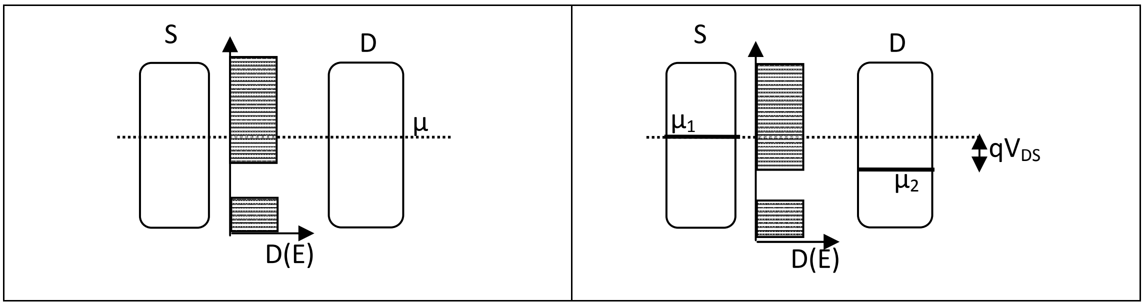
Πρόβλημα 1



Το κανάλι ενός transistor MOSFET, έχει μήκος μερικές δεκάδες νανόμετρα. Θεωρώντας ότι η αγωγή των ηλεκτρονίων μέσα από το κανάλι γίνεται βαλλιστικά και η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή 10^3/eV, να σχεδιαστεί το ενεργειακό διάγραμμα και να υπολογιστεί η αγωγιμότητα G. Να εξηγηθεί ο κορεσμός του ρεύματος για μεγάλες τάσεις. Υποθέστε ότι η τάση V_{DS} δεν επηρεάζει το δυναμικό του καναλιού.

Λύση:



Το ρεύμα μεταξύ S & D φτάνει σε κορεσμό όταν το δυναμικό του καναλιού ελέγχεται ηλεκτροστατικά από την πύλη και αυτή είναι η επιθυμητή συμπεριφορά ενός καλά σχεδιασμένου transistor. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να θεωρήσουνε την επαφή S ότι βρίσκεται σταθερά σε δυναμικό 0V (δηλ. στη γείωση), οπότε η αύξηση της τάσης V_{DS} προκαλεί την μετατόπιση των ενεργειακών καταστάσεων μόνο στο D. Όπως φαίνεται στο ενεργειακό διάγραμμα, καθώς το ηλεκτροχημικό δυναμικό της επαφής D μετατοπίζεται προς τα κάτω βάζει ενεργειακές καταστάσεις στο παράθυρο των μ_1 και μ_2 μέχρι την στιγμή που περνάει κάτω από το όριο της ζώνης αγωγιμότητας. Από εκεί και πέρα η αύξηση της τάσης δεν βάζει νέες καταστάσεις στο παράθυρο και το ρεύμα παραμένει σταθερό. (Υποτίθεται ότι η ζώνη σθένους είναι πολύ χαμηλά)

Το ρεύμα προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα μέσα από μία κατάσταση επί το πλήθος των καταστάσεων που βρίσκονται μέσα στο παράθυρο που ορίζουν τα ηλεκτροχημικά δυναμικά.

I= $\boxed{\text{ρεύμα μέσα από μία κατάσταση}}$ X $\boxed{\text{πλήθος καταστάσεων μεταξύ } \mu_1 \,\&\, \mu_2}$

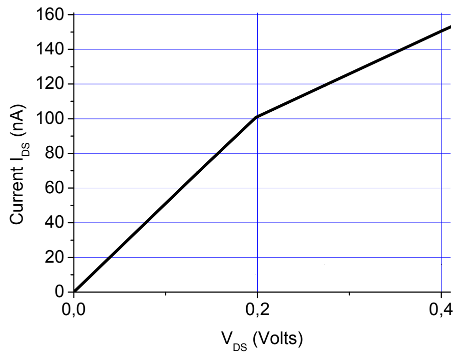
$$I = \frac{q\gamma}{\hbar} \times qVD$$

οπότε $i = \frac{q^2\gamma}{\hbar}VD$ όπου V η τάση ανάμεσα στις δύο επαφές και D η πυκνότητα ενεργ. καταστάσεων.

Από την γ. παράσταση προκύπτει ότι για V=0,2Volt το ρεύμα είναι ίσο με 120nA.

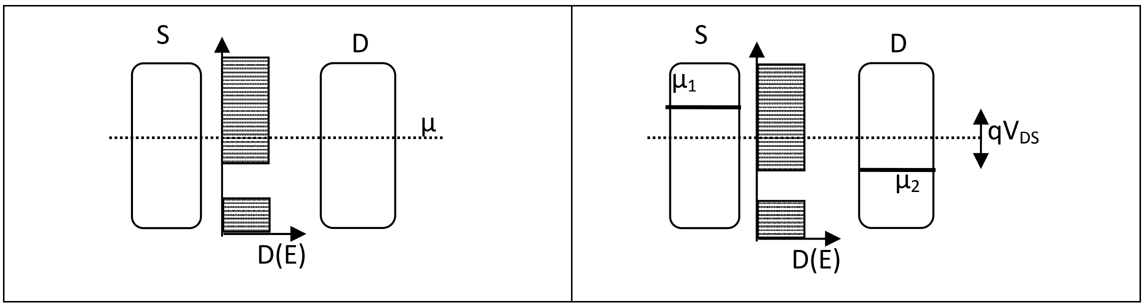
Η αγωγιμότητα είναι ίση με $G = \frac{2q^2}{h}(\pi D\gamma)$ ή $G = \frac{q^2}{\hbar}(D\gamma)$ οπότε από την εξίσωση του ρεύματος προκύπτει ότι $G = \frac{i}{V} = \frac{1{,}2\mu A}{0{,}2V} = \frac{1}{0{,}2V/1{,}2\mu A} = \frac{1}{167k\Omega}$

Πρόβλημα 2



Το κανάλι ενός transistor MOSFET, έχει μήκος μερικές δεκάδες νανόμετρα. Θεωρώντας ότι η αγωγή των ηλεκτρονίων μέσα από το κανάλι γίνεται βαλλιστικά και η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή 10^4/eV, να σχεδιαστεί το ενεργειακό διάγραμμα και να υπολογιστεί η αγωγιμότητα. Να εξηγηθεί γιατί το ρεύμα δεν φτάνει σε κορεσμό για μεγάλες τάσεις.

Λύση:

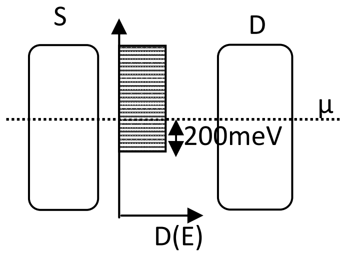


Το ρεύμα μεταξύ S & D δεν φτάνει σε κορεσμό όταν το δυναμικό του καναλιού δεν ελέγχεται ηλεκτροστατικά από την πύλη. Στην περίπτωση αυτή η αύξηση της τάσης V_{DS} μετατοπίζει τις ενεργειακές καταστάσεις του S προς τα πάνω και τις ενεργειακές καταστάσεις του D προς τα κάτω. Υποθέτουμε ότι κάθε αύξηση της τάσης V_{DS} κατά 1V, μετατοπίζει τις ενεργειακές καταστάσεις των κατά 0,5eV σε καθεμιά από τις δύο επαφές S & D έτσι ώστε η μεταξύ τους απόσταση να είναι 1eV. Όπως φαίνεται στο ενεργειακό διάγραμμα, καθώς τα ηλεκτροχημικά δυναμικά των επαφών S & D μετατοπίζονται προς τα πάνω και κάτω αντίστοιχα βάζουν ενεργειακές καταστάσεις στο παράθυρο των μ_1 και μ_2 μέχρι την στιγμή που το ηλεκτροχημικό δυναμικό της επαφής D περνάει κάτω από το όριο της ζώνης αγωγιμότητας. Από εκεί και πέρα η αύξηση της τάσης βάζει νέες καταστάσεις στο παράθυρο μόνο από την πλευρά του S οπότε το ρεύμα συνεχίζει να αυξάνεται με τον μισό ρυθμό απ' ότι πριν. (Υποτίθεται ότι η ζώνη σθένους είναι πολύ χαμηλά). Πράγματι, όταν η τάση αυξάνεται από τα 0V μέχρι τα 0,2V η αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος είναι 100nA ενώ όταν αυξάνεται από τα 0,2V μέχρι τα 0,4V, η αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος είναι 50nA. Αυτό σημαίνει πως για τάση V_{DS}=0,2V τα ηλεκτροχημικά δυναμικά μ_1 και μ_2 απέχουν 0,2eV μεταξύ τους και το καθένα τους έχει μετατοπιστεί κατά 0,1eV σε σχέση με το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό μ. Εφόσον για V_{DS}>0,2V το ρεύμα αυξάνεται με μισό ρυθμό απ' ότι πριν σημαίνει ότι το ηλεκτροχημικό δυναμικό μ_2 περνάει το όριο της ζώνης αγωγιμότητας ακριβώς όταν V_{DS}=0,2V (το μ_2 έχει κατέβει σε σχέση με την αρχική του θέση κατά 0,1eV) οπότε το όριο της ζώνης αγωγιμότητας βρίσκεται 100meV κάτω από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό μ.

Η αγωγιμότητα για τάσεις <0,2V είναι $G = \frac{i}{V} = \frac{100nA}{0,2V} = \frac{1}{0,2V/0,1\mu A} = \frac{1}{2000k\Omega}$

Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης η αγωγιμότητα είναι η μισή.

Πρόβλημα 3



Η αγωγή ηλεκτρονίων μέσα από το κανάλι ενός transistor MOSFET γίνεται βαλλιστικά και η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή 10^2/eV. Το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών βρίσκεται 200meV πιο πάνω από το κάτω όριο της ζώνης αγωγιμότητας. Εάν ο ρυθμός διαφυγής είναι γ=10meV, $\hbar = 6,6 \times 10^{-16} eV - sec$, q=1,6x$10^{-19}$Cb

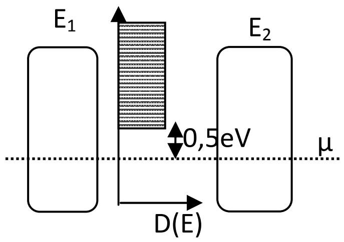
α) Να υπολογιστεί το ρεύμα μέσα από μία κατάσταση.

β) Να σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα όταν V_{DS}=0,5V και να υπολογιστεί το ρεύμα αναφέροντας και τις όποιες παραδοχές κάνετε. Σχεδιάστε την καμπύλη I=I(V).

Πρόβλημα 4

Στα άκρα ενός μικρού αγωγού δύο διαστάσεων έχουν δημιουργηθεί με εναπόθεση δύο μεγάλες μεταλλικές επαφές S και D. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στον μικρό αγωγό είναι D=100καταισ/eV. Η κίνηση ηλεκτρονίων μέσα από τον αγωγό γίνεται βαλιστικά. Η χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση βρίσκεται 200meV πάνω από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό. Εάν η σταθερά διαφυγής είναι γ=10meV α) να υπολογίστε το χρόνο που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να περάσει από τη μία επαφή στην άλλη (0,5μ) β) να σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα ζωνών (1μ) γ) Να σχεδιάστε την χαρακτηριστική ρεύματος τάσης για τάση από -1 έως 1Volt (1μ). Απαντήστε στα ίδια ερωτήματα στην περίπτωση που η χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη βρίσκεται 200meV χαμηλότερα από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό (2,5μ). $\hbar = 6{,}6 \times 10^{-16} eV - sec.$ q=1,6x10^{-19}Cb.

Πρόβλημα 5



Το μήκος ελεύθερης διαδρομής σε έναν υλικό έχει υπολογιστεί ότι είναι περίπου 3μm. Ένας αγωγός έχει μήκος 100nm και στα άκρα του έχουν δημιουργηθεί, με εναπόθεση μετάλλου, δύο μεγάλες επαφές. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στον αγωγό είναι σταθερή ίση με 10καταστάσεις/eV. Το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών βρίσκεται 0,5eV πιο κάτω από το κάτω όριο της ζώνης αγωγιμότητας. Εάν ο ρυθμός διαφυγής είναι γ=20meV, $\hbar = 6{,}6 \times 10^{-16} eV - sec$

α) Να υπολογιστεί το ρεύμα και η αγωγιμότητα όταν η τάση μεταξύ των επαφών είναι 1,10V

β) Να σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα όταν η τάση των επαφών είναι 2V και να υπολογίσετε το ρεύμα.

γ) Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης όταν η τάση αυξάνεται από τα μηδέν στα 3V.

Λύση:

α) V=1,10Volts οπότε το E_1 έχει ανέβει κατά 0,55eV και το E_2 έχει κατέβει κατά 0,55eV. Οι καταστάσεις απέχουν η μία από την άλλη 1eV/10=100meV. Μέσα στο παράθυρο των ηλ/χημικών δυναμικών υπάρχει μία μόνο κατάσταση. Ο ρυθμός διαφυγής είναι

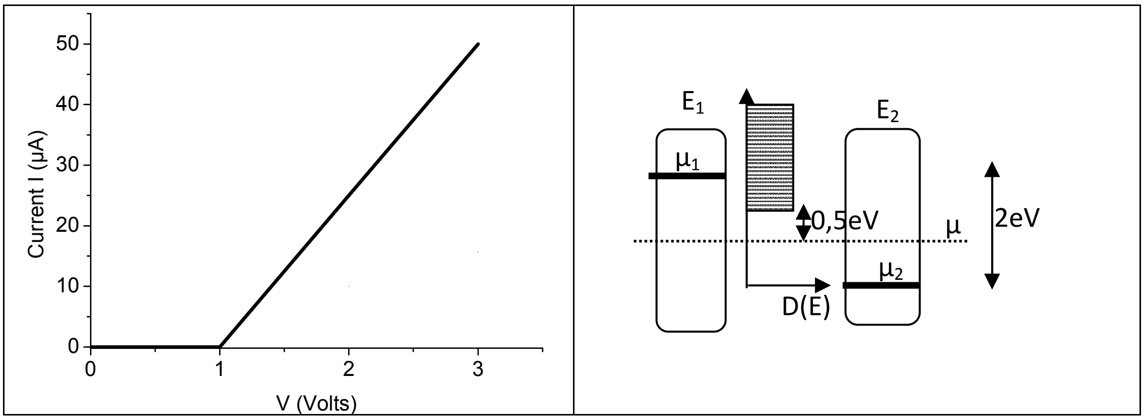
$$\frac{\gamma}{\hbar} = \frac{20 \times 10^{-3}}{6{,}6 \times 10^{-16}} = 3 \times 10^{13} \eta\lambda / \sec$$

$$t_{o\lambda} = \frac{2}{3 \times 10^{13}} = 7 \times 10^{-14} \sec$$

$i = \dfrac{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{7 \times 10^{-14}} \approx 5 \mu A$. Η μέγιστη αγωγιμότητα μέσα από μια κατάσταση είναι:

$$2\frac{q^2}{h} = \frac{1}{12{,}5 k\Omega}$$

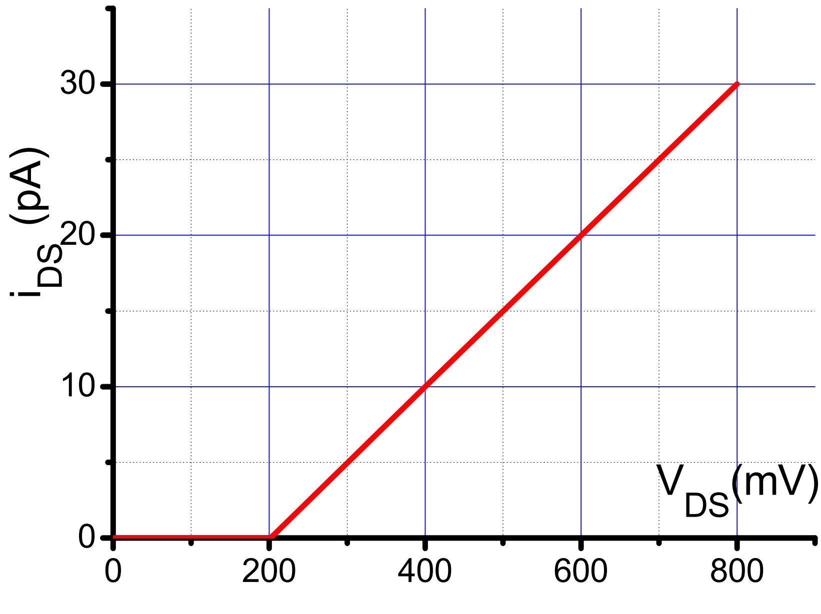
Το παράθυρο έχει εύρος 2eV αλλά στην αγωγιμότητα συμμετέχουν οι καταστάσεις που περιλαμβάνονται στο 0,5eV, δηλ. 5 καταστάσεις. Οπότε το συνολικό ρεύμα θα είναι 25μA.



γ) Το ρεύμα είναι μηδέν μέχρι το 1Volt, γιατί τότε αρχίζουν να μπαίνουν καταστάσεις μέσα στο παράθυρο των ηλεκτοχημικών δυναμικών. Το πλήθος των καταστάσεων αυξάνεται με την αύξηση της τάσης λόγω των νέων καταστάστεων που βάζει η αριστερή επαφή. Αφού η πυκνότητα καταστάσεων είναι σταθερή το ρεύμα θα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Στα 3V το πλήθος των καταστάσεων που συμμετέχουν στην αγωγιμότητα είναι 10 οπότε το συνολικό ρεύμα είναι 50μA. Στην καμπύλη δεν παρατηρούνται άλματα γιατί: η μια κατάσταση απέχει από την απόμενη 100meV. Η θερμική ενέργεια είναι 26meV και η πλάτυνση των καταστάασεων είναι περίπου 2γ δηλ. 40meV, σύνολο 66meV. Επιπλέον στο 1V η καμπύλη είναι στρογγυλεμένη και αρχίζει να άγει λίγο πιο κάτω από το 1Volt.

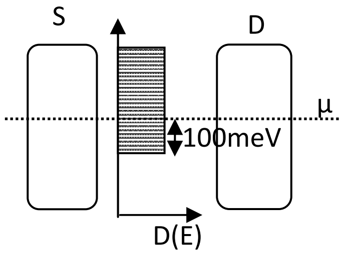
Πρόβλημα 6

Στα άκρα ενός μικρού αγωγού δύο διαστάσεων έχουν δημιουργηθεί με εναπόθεση δύο μεγάλες μεταλλικές επαφές S και D. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στον μικρό αγωγό είναι D=500κατασ/eV.



Δίνεται η χαρακτηριστική i_{DS}-V_{DS} της διάταξης. α) Με βάση την χαρακτηριστική i_{DS}-V_{DS}, σχεδιάστε το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών όταν η τάση V_{DS}=0V και εξηγείστε πως βγαίνει η εξίσωση για το ρεύμα μέσα από μια ενεργειακή κατάσταση (1μ). β) Σχεδιάστε το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών όταν V_{DS}=400mV. Πόσες ενεργειακές καταστάσεις υπάρχουν τότε μέσα στο παράθυρο των ηλεκτροχημικών δυναμικών (1,5μ); γ) Από την τιμή του ρεύματος για τάση 400mV που φαίνεται στο διάγραμμα, υπολογίστε τον ρυθμό διαφυγής $\frac{\gamma}{\hbar}$. Πόσο χρόνο χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να περάσει από την επαφή S στην επαφή D (1,5μ); $\hbar = 6{,}6 \times 10^{-16} eV - sec.$

Πρόβλημα 7



Η αγωγή ηλεκτρονίων μέσα από το κανάλι ενός transistor MOSFET γίνεται βαλλιστικά και η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή 500καταστάσεις/eV. Το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών βρίσκεται 100meV πιο πάνω από το κάτω όριο των καταστάσεων του καναλιού. Εάν ο ρυθμός διαφυγής είναι γ=2meV.

α) Να υπολογιστεί το ρεύμα μέσα από μία κατάσταση (να πάρετε υπόψη σας το σπιν των ηλεκτρονίων που εποικίζουν κάθε κατάσταση) (0,7μ)

β) Να σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα όταν V_{DS}=0,2V και V_{DS}=0,4V. Να σχεδιάστε την καμπύλη I=I(V) μέχρι τάση 400mV. (1μ)

γ) Σχεδιάστε την καμπύλη I=I(V) μέχρι τάση V_{DS}=0,2V όταν στην πύλη έχει εφαρμοστεί τάση V_{gS}=-0,150V (0,8μ)

Λύση: Μέγιστο ρεύμα μέσα από μια κατάσταση $i_{\uparrow\downarrow} = \frac{q\gamma}{\hbar} = 0{,}5\mu\text{A}$, υποθέτουμε T=0K. Στα 200mV το μ_2 έχει ευθυγραμιστεί με το κάτω άκρο των καταστάσεων του καναλιού (ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας) και το ρεύμα θα είναι

$$I(200mV) = i_{\uparrow\downarrow} \times (\pi\lambda.\kappa\tau\sigma\tau) = 0{,}5 \times \frac{500\kappa\tau\sigma}{1000meV} \times 200meV = 50\mu\text{A}$$

Για τάση μεγαλύτερη από 200mV το μ_2 συνεχίζει να κατεβαινει προς τα κάτω αλλά δεν προσθέτει νέες καταστασεις στο παραθυρο των ηλ. χημ. δυναμικών. Το μ_1 ανεβαινει και προσθέτει νεες καταστάσεις επομένως το ρευμα θα αυξάνεται με μισό ρυθμό απ' ότι πριν.

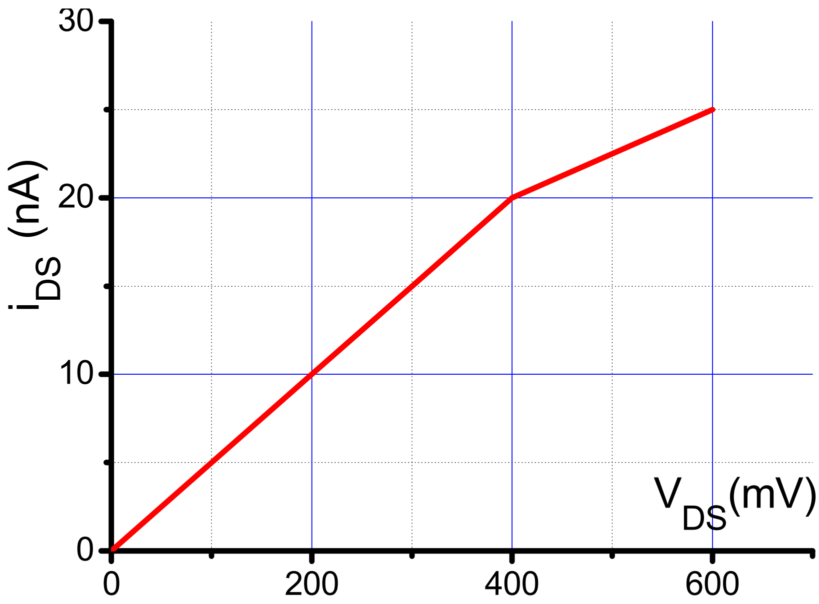
$$I(400mV) = i_{\uparrow\downarrow} \times (\pi\lambda.\kappa\tau\sigma\tau) = 0{,}5 \times \frac{500\kappa\tau\sigma}{1000meV} \times 300meV = 75\mu\text{A}$$

Όταν στη πύλη εφαρμόζεται τάση -150mV, οι καταστάσεις του καναλιού ανεβαίνουν κατά 150meV. Στο παράθυρο των ηλ.χημ. δυναμικών (V=200mVolt) υπάρχουν

$\frac{500\kappa\tau\sigma}{1000meV}\times 50meV = 25\kappa\alpha\tau\alpha\sigma\tau.$ Το ρεύμα είναι 0 μέχρι το 50mV περίπου και στη συνέχεια αυξάνεται γραμμικά και στα 200mV παίρνει την τιμή $0{,}5\times 25 = 12{,}5\mu\mathrm{A}$

Θέμα 3^{o} (μονάδες 4**):**

Στα άκρα ενός μικρού αγωγού δύο διαστάσεων έχουν δημιουργηθεί με εναπόθεση δύο μεγάλες μεταλλικές επαφές S και D. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στον μικρό αγωγό είναι D=1500κατασ/eV.



Δίνεται η χαρακτηριστική i_{DS}-V_{DS} της διάταξης. α) Με βάση την χαρακτηριστική i_{DS}-V_{DS}, σχεδιάστε το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών όταν η τάση V_{DS}=400mV και V_{DS}=600mV και εξηγείστε τη μορφή της χαρακτηριστικής (1μ). β) Στα διαγράμματα ενεργειακών ζωνών, πόσες ενεργειακές καταστάσεις υπάρχουν μέσα στο παράθυρο των ηλεκτροχημικών δυναμικών σε κάθε περίπτωση;. (1,5μ); γ) Υπολογίστε τη σταθερά διαφυγής γ. Πόσο χρόνο χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να περάσει από την επαφή S στην επαφή D; Υπολογίστε το ρεύμα μέσα από μία κατάσταση (1,5μ);

Πρόβλημα 8

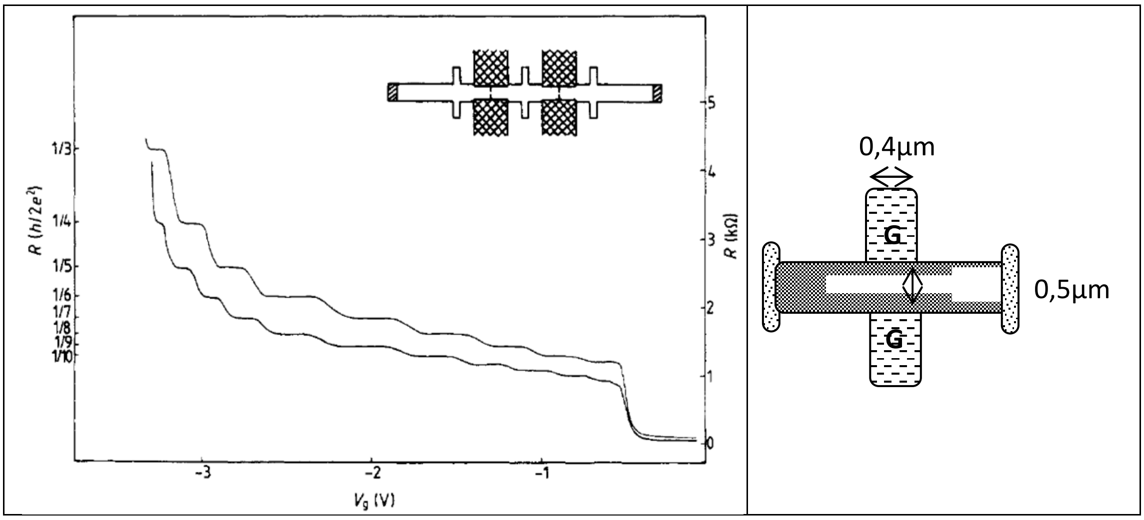
Η αγωγιμότητα μέσα από ένα αγωγό μικρού μήκους γίνεται βαλλιστικά. Η πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων στον αγωγό είναι σταθερή ίση με 1200καταστάσεις/eV. Στα άκρα του αγωγού έχουν δημιουργηθεί δυο συμμεντρικές επαφές E_1 και E_2. Οι χωρητικότητες αγωγού-επαφών είναι C_1 και C_2 αντίσοιχα. Ο συντελεστής διαφυγής είναι 0,5meV. Το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών βρίσκεται 0,2eV πιο πάνω από το κάτω όριο της ζώνης αγωγιμότητας. Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης από 0 έως 1Volt. Δίνεται ότι: $\frac{C_1}{C_2} = 9$

Πρόβλημα 9

Η γραφική παράσταση δείχνει την μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της τάσης πύλης στην διάταξη του σχήματος. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν διδιάστατο αγωγό GaAs. Η πύλη αποτελείται από δύο μεταλλικές επαφές που έχουν εναποτεθεί εκατέρωθεν του αγωγού. Ο διδιάστατος αγωγός και οι επαφές της πύλης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Εφαρμόζοντας τάση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια της πύλης, ο διδιάστος αγωγός απογυμνώνεται από φορείς και απομένει μόνο μια στενή λωρίδα που περιέχει ευκίνητους φορείς. Η περιοχή αυτή είναι αρκούντως στενή έτσι ώστε να περιέχει μόνο ένα μικρό πλήθος ενεργειακών καταστάσεων ενώ παράλληλα είναι αρκούντως κοντή έτσι ώστε η διέλευση των ηλεκτρονίων μέσα από αυτή να γίνεται βαλλιστικά. Το μήκος της πύλης είναι 0,4μm και η απόσταση των δύο ηλεκτροδίων της πύλης είναι 0,5μm (βλ. σχήμα).

α) Να βρεθεί το μήκος ελεύθερης διαδρομής του ηλεκτρονίου όταν είναι γνωστό ότι η ευκινησία είναι 2,5x10^{5}cm^2/Vsec και η ενεργός μάζα των ελεύθερων ηλεκτρονίων στο GaAs είναι $m^* = 0{,}067 m_e$. Να συγκριθεί με τις διαστάσεις της πύλης και να αιτιολογηθεί εάν είναι δικαιολογημένη η υπόθεση της βαλλιστικής διέλευσης των ηλεκτρονίων μεταξύ των επαφών. $m_e = 9{,}1 \times 10^{-31} kgr$

β) Να αιτιολογηθεί η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της τάσης πύλης.



Λύση: α) Η μέση κινητική ενέργεια των ελευθέρων ηλεκτρονίων που οφείλεται στην θερμική κίνηση είναι $\frac{1}{2} m^* \upsilon^2 = \frac{n}{2} kT$

όπου m* η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου στο GaAs, υ: η θερμική ταχύτητα, k: η σταθερά Boltzmann, T: η απόλυτη θερμοκρασία και n: οι βαθμοί ελευθερίας του ηλεκτρονίου. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε ένα διδιάστατο αέριο ηλεκτρονίων οπότε n=2 (δύο βαθμοί ελευθερίας). Εισάγουμε τις τιμές στην εξίσωση για να υπολογίσουμε την θερμική ταχύτητα.

$\frac{1}{2}m^*\upsilon^2 = kT$, οπότε $\upsilon^2 = \frac{2kT}{m^*}$

$$\upsilon^2 = \frac{2\times 1,38\times 10^{-23}}{0,067\times 9,1\times 10^{-31}} = 4,5\times 10^8 m^2/\sec^2$$

$$\upsilon = 2,12\times 10^4 m/\sec$$

Η ευκινησία των ηλεκτρονίων δίνεται από τη σχέση: $\mu = \frac{q}{m^*}\tau$, όπου τ: ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών συγκρούσεων του ηλεκτρονίου. Λύνοντας ως προς τ προκύπτει:

$$\tau = \frac{\mu}{q}m^* = \frac{250}{1,6\times 10^{-19}}\times 0,067\times 9,1\times 10^{-31}$$

$$\tau = 9,5\times 10^{-11}\sec$$

Το μήκος ελεύθερης διαδρομής είναι $l_e = \upsilon_{o\lambda}\cdot\tau$

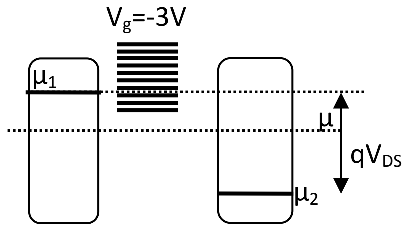
Επειδή όμως η ταχύτητα ολίσθησης είναι πολύ μικρότερη από την θερμική ταχύτητα, μπορούμε να αντικαταστήσουμε την ολική ταχύτητα με την θερμική.

$$l_e = \upsilon\cdot\tau = 2,12\times 10^4\times 9,5\times 10^{-11} = 2\times 10^{-6} = 2\mu m$$

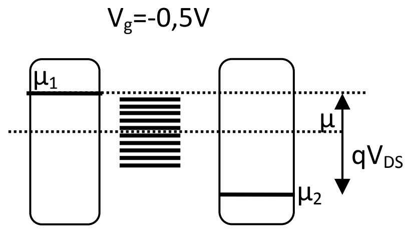
Η τάση της πύλης περιορίζει το αέριο των ελευθέρων ηλεκτρονίων σε μια περιοχή που έχει μήκος περίπου ίσο με το μήκος της πύλης δηλ. 0,4μm. Το μήκος αυτό είναι πολύ μικρότερο από το μήκος ελεύθερης διαδρομής 2μm, κατά συνέπεια η υπόθεση της βαλλιστικής αγωγής είναι σωστή.

β) Η αγωγιμότητα μιας ενεργειακής κατάστασης (όταν λαμβάνουμε υπόψη το γεγονός ότι μια κατάσταση μπορεί να βολέψει δύο ηλεκτρόνια, ένα με σπίν επάνω και ένα με σπιν κάτω) είναι $2\frac{q^2}{h}$ Κατά συνέπεια η αντίσταση που θα μετράμε όταν συμμετέχει μία μόνο κατάσταση στην αγωγιμότητα θα είναι $\frac{h}{2q^2}$. Όταν συμμετέχουν 3 καταστάσεις –για παράδειγμα- στην αγωγιμότητα θα έχουμε τριπλάσιο ρεύμα άρα τριπλάσια αγωγιμότητα και η αντίσταση θα γίνεται το 1/3 της αντίστασης της μιας στάθμης οπότε θα είναι $\frac{1}{3}\frac{h}{2q^2}$.

Το ενεργειακό διάγραμμα σε αυτή την περίπτωση είναι όπως φαίνεται παρακάτω. Η τάση ανάμεσα στις δύο επαφές (S & D) χωρίζει τα ηλεκτροχημικά δυναμικά κατά qV_{DS}. Όταν η τάση στην πύλη είναι -3V υπάρχουν μόνο τρεις καταστάσεις μέσα στο παράθυρο που ορίζουν τα ηλεκτροχημικά δυναμικά μ_1 και μ_2. Εάν η πύλη γίνει λιγότερο αρνητική οι ενεργειακές καταστάσεις του καναλιού θα τραβηχτούν προς τα κάνω και έτσι θα συμμετέχουν περισσότερες καταστάσεις στην αγωγή.



Εάν συμμετέχουν 10 καταστάσεις η τιμή της αντίστασης θα είναι προφανώς $\frac{1}{10}\frac{h}{2q^2}$. Από την χαρακτηριστική ρεύματος τάσης πύλης φαίνεται ότι ο περιορισμός του διδιάστατου αερίου των ελεύθερων ηλεκτρονίων αρχίζει όταν η τάση πύλης είναι -0,5V. Για την τιμή αυτή, η αντίσταση είναι $\frac{1}{10}\frac{h}{2q^2}$ που σημαίνει ότι η αγωγή γίνεται μέσω 10 ενεργειακών καταστάσεων.

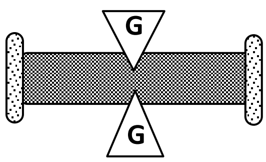


Παρατηρούμε ακόμα ότι στο -3V η αντίσταση γίνεται $\frac{1}{3}\frac{h}{2q^2}$ (συμμετέχουν τρεις καταστάσεις). Κατά συνέπεια όσο πιο αρνητική γίνεται η τάση στην πύλη τόσο στενεύει το αέριο των ηλεκτρονίων οπότε συμμετέχουν λιγότερες καταστάσεις στην αγωγή με αποτέλεσμα η αντίσταση να αυξάνεται κλιμακωτά με βήματα ίσα με $\frac{h}{2q^2}$

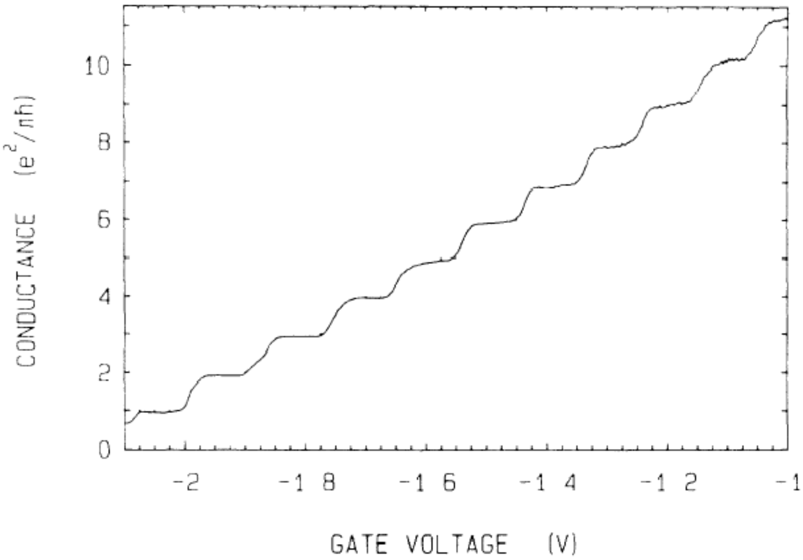
Είναι προφανές πως εάν η ακρίβεια του πειράματος το επέτρεπε, θα περίμενε κανείς να φτάσει (γύρω στα -4V τάση στην πύλη) μέχρι την τιμή της αντίστασης $\frac{h}{2q^2}$ που θα οφειλόταν στην αγωγιμότητα μέσα από μία κατάσταση μόνο!

Πρόβλημα 10

Μετρήσεις αγωγιμότητας σε μια διάταξη της μορφής του διπλανού σχήματος έδωσαν την χαρακτηριστική αγωγιμότητας-τάσης πύλης που δίνεται παρακάτω. Ο αγωγός (GaAs) είναι δύο διαστάσεων, δηλαδή είναι σαν μια ταινία

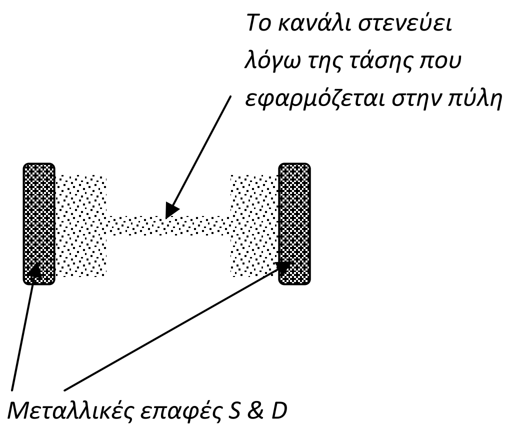


όπως φαίνεται στο σχήμα με αμεληταίο πάχος. Εφαρμόζοντας μια τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της πύλης μπορούμε να απογυμνώσουμε από φορείς το συγκεκριμένο τμήμα του αγωγού από ελεύθερους φορείς. Με τον τρόπο αυτό ο αγωγός θα συμπεριφέρεται σαν να παρουσιάζει ένα στένεμα ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια της πύλης και έτσι η αντίσταση του αγωγού θα είναι περίπου ίση με την αντίσταση της περιοχής που βρίσκεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της πύλης. Να εξηγηθεί η εξάρτηση της αγωγιμότητας από την τάση της



πύλης.

Λύση: Η διάταξη μετά την εφαρμογή τάσης στην πύλη συμπεριφέρεται σαν ένας πολύ στενός αγωγός που πλαταίνει στα άκρα και συνδέεται με δύο επαφές. Το πόσο στενός είναι ο αγωγός καθορίζεται από την τάση της πύλης. Από την μορφή της καμπύλης αγωγιμότητας-τάσης πύλης φαίνεται ότι έχουμε βαλλιστική αγωγιμότητα, δηλ. το μήκος του στενού αγωγού είναι περίπου ίσο ή μικρότερο από το μήκος ελεύθερης διαδρομής του ηλεκτρονίου. Σύμφωνα με την εκφώνηση ο αγωγός είναι σαν μια ταινία δηλ. είναι δύο διαστάσεων. Στην περίπτωση αυτή η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή δηλ. D(E)=D.



Η αγωγιμότητα παρουσιάζει άλματα ίσα με $\frac{q^2}{\pi\hbar} = \frac{q^2}{\pi\frac{h}{2\pi}} = 2\frac{q^2}{h}$. Για τάση στην πύλη ίση με -1Volt η αγωγιμότητα είναι ίση με $11\left(2\frac{q^2}{h}\right)$ πράγμα που σημαίνει ότι συμμετέχουν 11 ενεργειακές στάθμες στην αγωγιμότητα. Για τάση ίση με -2,2Volt η αγωγιμότητα είναι ίση με $2\frac{q^2}{h}$ πράγμα που υποδηλώνει ότι συμμετέχει μόνο μία ενεργειακή κατάσταση στην αγωγιμότητα. Παρατηρούμε ακόμα ότι για κάθε μεταβολή της τάσης πύλης ίση με 0,1Volt έχουμε και ένα άλμα στην αγωγιμότητα. Αυτό δείχνει ότι οι ενεργειακές καταστάσεις του καναλιού ισαπέχουν μεταξύ τους, πράγμα που συμφωνεί με την σταθερή πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων που έχει ο αγωγός λόγω του ότι είναι δύο διαστάσεων. Το ενεργειακό διάγραμμα για τάση πύλης -1V φαίνεται παρακάτω.