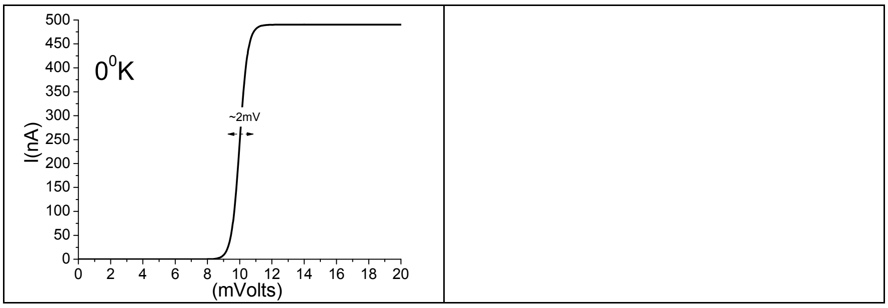
Πρόβλημα 1

Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης στους 0^0K και 300^0K για την αγωγή μέσα από μία κατάσταση η οποία βρίσκεται 10meV πάνω από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών. γ=2meV

Λύση:

Στους 0^0K το ρεύμα αυξάνεται από το μηδέν στην τελική τιμή του για μεταβολή της τάσης ίση με $\Delta V = \frac{2\gamma}{q} = 4mVolt$, η οποία οφείλεται στην διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης κατά 2γ. Το ρεύμα είναι μηδέν μέχρι τα 8mV περίπου.

Στους 300^0K η τάση που απαιτείται για να πάρει το ρεύμα την μέγιστη τιμή του είναι πολύ μεγαλύτερη και οφείλεται στο άπλωμα της συνάρτησης Fermi των επαφών κατά κύριο λόγο και πολύ λιγότερο στην διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης του αγωγού.



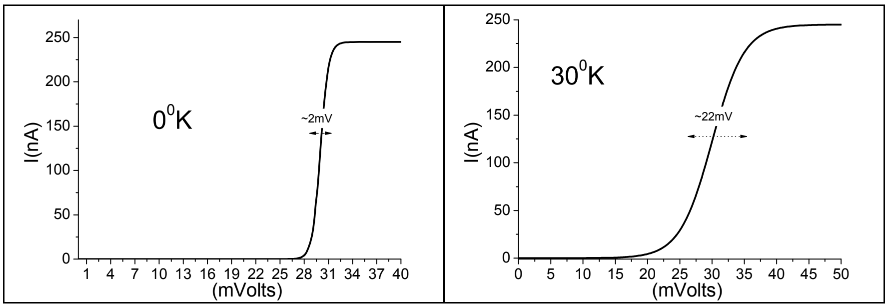
Πρόβλημα 2

Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης στους 0^0K και 30^0K για την αγωγή μέσα από μία κατάσταση η οποία βρίσκεται 30meV πάνω από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών. γ=1meV

Λύση: Στούς 0^0Kelvin είναι $kT = 0$ κατά συνέπεια η τάση που απαιτείται για να πάρει το ρεύμα την μέγιστη τιμή καθορίζεται από την διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης. Η διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης προκύπτει από την εξίσωση $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$, και είναι ίση με ότε $\Delta E \approx 2\gamma$, ή $\Delta V = \frac{2\gamma}{q} = 2mVolt$.

Στούς 30^0K είναι $kT = 2{,}5meV$ κατά συνέπεια κανείς θα πρέπει να λάβει υπόψη του τόσο την διαπλάτυνση λόγω της σύνδεσης του αγωγού με τις επαφές $\Delta V = \frac{2\gamma}{q} = 2mVolt$

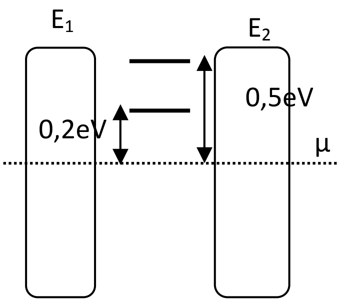
όσο και αυτήν που οφείλεται στη θερμοκρασία $\frac{8kT}{q} = 20mV$. Συνολικά είναι $\frac{8kT}{q} + \frac{2\gamma}{q} = 22mV$.



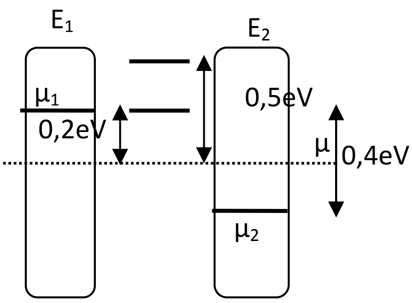
Πρόβλημα 3

Στα άκρα ενός μικρού αγωγού δημιουργούνται δύο μεγάλες επαφές με εξάχνωση μετάλλου. Ο μικρός αγωγός έχει δύο ενεργειακές καταστάσεις που απέχουν 200meV και 500meV αντίστοιχα από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών. Να σχεδιαστεί και να εξηγηθεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για θερμοκρασία 0^0K, υποθέτοντας ότι το γέμισμα της μιας κατάστασης δεν επηρεάζει την ενέργεια της άλλης. Να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα υποθέτοντας ότι γ=5meV. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης ανάμεσα στις δυο επαφές.

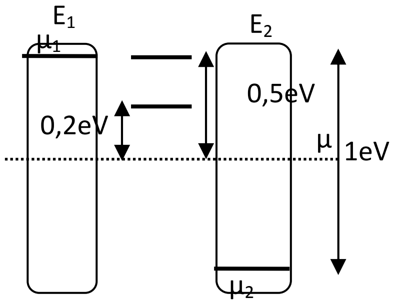
Λύση:



Θεωρούμε ότι το υψηλό δυναμικό της πηγής συνδέεται στην επαφή E_2 και το χαμηλό στην E_1. Όσο αυξάνεται η τάση μεταξύ των δύο επαφών τα ηλεκτροχημικά δυναμικά μετατοπίζονται εξίσου προς τα πάνω (της επαφής E_1) και προς τα κάτω (της E_2).



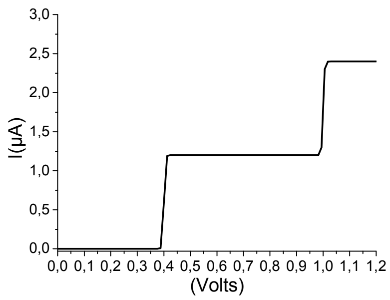
Το ρεύμα είναι μηδέν μέχρι τη στιγμή που η πρώτη ενεργειακή κατάσταση μπαίνει στο παράθυρο που ορίζουν τα ηλεκτροχημικά δυναμικά. Αυτό γίνεται όταν η τάση μεταξύ των επαφών είναι 0,4V. Τα μ_1 και μ_2 έχουν μετατοπιστεί κατά 0,2eV σε σχέση με το μ και απέχουν 0,4eV.



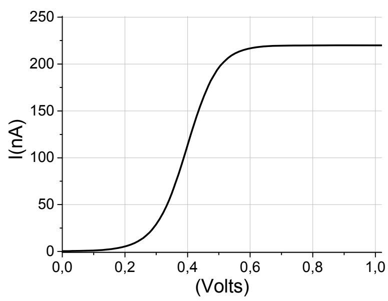
Όταν η τάση μεταξύ των δύο επαφών έχει γίνει περίπου 400mV το ρεύμα μέσα από την πρώτη κατάσταση παίρνει την μέγιστη τιμή του που είναι

$$i_1 = \frac{q\gamma}{\hbar} = \frac{1{,}6\times10^{-19}\times0{,}005}{6{,}6\times10^{-16}} = 1{,}2\times10^{-6} = 1{,}2\mu A$$

Όταν τα ηλεκτροχημικά δυναμικά απέχουν κατά 1eV αρχίζει να συμμετέχει στην αγωγιμότητα και η δεύτερη στάθμη οπότε το συνολικό ρεύμα γίνεται 2,4μA.



Πρόβλημα 4



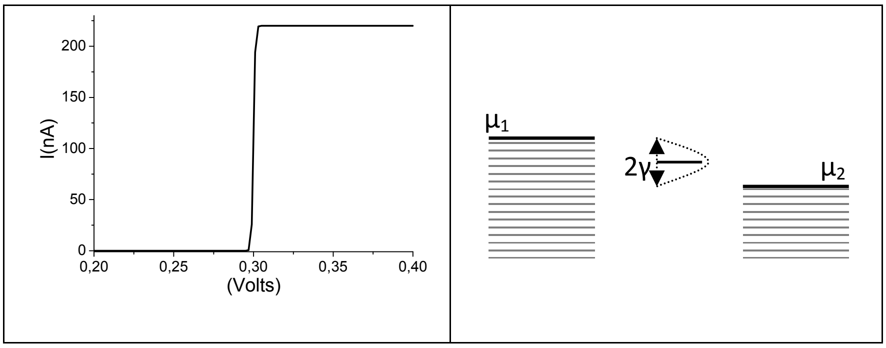
Δίνεται η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης στους 300^0K για την περίπτωση αγωγιμότητας μέσα από μία κατάσταση. Να υπολογιστεί: α) Πόσα meV απέχει, κατά προσέγγιση, η κατάσταση από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό. β) Ο συντελεστής διαφυγής γ και ο ρυθμός με τον οποίο μπαίνουν τα ηλεκτρόνια στο κανάλι γ) Η αγωγιμότητα της κατάστασης στους 300^0K . δ) Η αγωγιμότητα όταν η θερμοκρασία είναι 0^0Kelvin.

Λύση: α) Το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται στα 200mV και φτάνει σε κορεσμό στα 600mV. Το εύρος τάσης είναι ανάλογο του kT . Στους 300^0K είναι περίπου ίσο με το πλάτος που έχει η περιοχή ενδιάμεσης κατάληψης στην κατανομή Fermi δηλαδή $\frac{8kT}{q} = 200meV$. Η ενεργειακή καταστασηση μπαίνει στο παράθυρο των ηλ.χημ. δυναμικών όταν η τάση είναι ~400mV. Η κατάσταση θα βρίσκεται περίπου 200meV πάνω (ή κάτω) από το κοινό ηλ.χημ. δυναμικό.

β) Χρόνος εισόδου στο κανάλι $\frac{\hbar}{\gamma}$, χρόνος εξόδου $\frac{\hbar}{\gamma}$, συνολικός χρόνος κίνησης $2\frac{\hbar}{\gamma}$. Κάθε κατάσταση μπορεί να εποικιστεί από 2 ηλεκτρόνια (spin επάνω και spin κάτω)

$i_{\uparrow\downarrow} = 2\frac{q}{2\hbar/\gamma} = \frac{q\gamma}{\hbar}$, οπότε $\gamma = \frac{i_{\uparrow\downarrow}\hbar}{q} = \frac{220nA \cdot 6,6\times10^{-16}}{1,6\times10^{-19}} = 0,91meV$. Ρυθμός εισόδου $\frac{\gamma}{\hbar} = 1,4\times10^{12}\eta\lambda/\sec$.

γ) Υπολογισμός της αγωγιμότητας $G = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{220nA}{0,2V} = 1,1\mu S = \frac{1}{909k\Omega}$. Η αγωγιμότητα μέσα από μία κατάσταση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από $\frac{1}{12,5k\Omega}$ οπότε η τιμή που βρέθηκε είναι αποδεκτή.

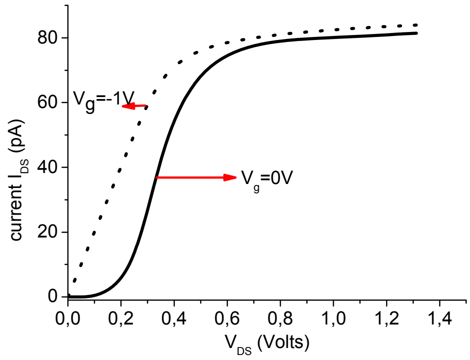


δ) Στους 0^0K είναι $kT = 0$ κατά συνέπεια η τάση που απαιτείται για να πάρει το ρεύμα την μέγιστη τιμή καθορίζεται από την διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης. Η διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης προκύπτει από την εξίσωση $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$. Σε χρονικό διάστημα $2\frac{\hbar}{\gamma}$ η κατάσταση ενοχλείται από ένα ηλεκτρόνιο δύο φορές: μία όταν φτάνει και μία όταν φεύγει (γεμίζει και αδειάζει). Σε χρονικό διάστημα $2\frac{\hbar}{\gamma}$ φτάνουν δύο ηλεκτρόνια (ένα με spin επάνω και ένα με spin κάτω) κατά συνέπεια η κατάσταση ενοχλείται συνολικά 4 φορές. Συνολικά, η κατάσταση ενοχλείται μία φορά κάθε $\frac{\hbar}{2\gamma}\sec$. Οπότε $\Delta E \cdot \frac{\hbar}{2\gamma} \approx \hbar \Rightarrow \Delta E \approx 2\gamma$, ή $\Delta V = \frac{2\gamma}{q} = 1,82mVolt$. Η αγωγιμότητα στους 0^0K είναι:

$$G = \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{220nA}{1,82mV} \approx 121\mu S = \frac{1}{8,3k\Omega}$$

Η αγωγιμότητα που υπολογίστηκε είναι μεγαλύτερη από το κβάντο της αγωγιμότητας γιατί στους υπολογισμούς έχει υποεκτιμηθεί η διαπλάτυνση της ενεργειακής κατάστασης. Για να αποκατασταθεί η τιμή του κβάντου αγωγιμότητας θα πρέπει η τάση ΔV να είναι 2πγ/q.

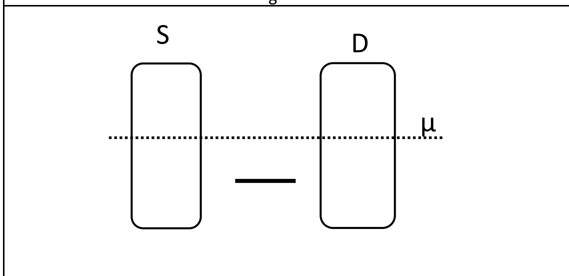
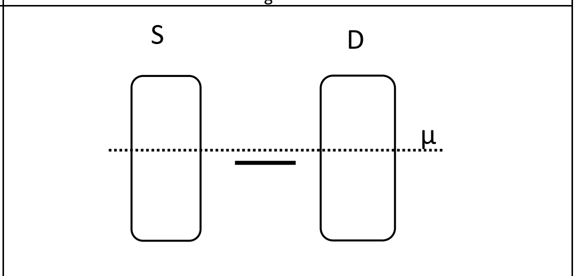
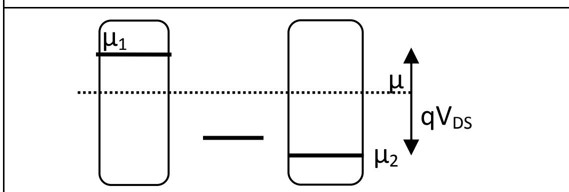
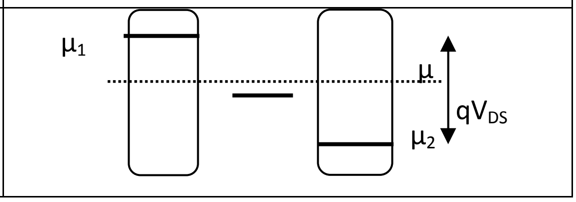
Πρόβλημα 5



Η αγωγή ηλεκτρονίων μέσα από ένα μικρό αγωγό γίνεται βαλλιστικά μέσω της μίας ενεργειακής κατάστασης η οποία βρίσκεται κοντά στο κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών που έχουν δημιουργηθεί στα άκρα του. Να εξηγήσετε τις γραφικές παραστάσεις του ρεύματος συναρτήσει της τάσης που εφαρμόζεται στις επαφές. α) Να γίνει το ενεργειακό διάγραμμα ζωνών για τις δύο τάσης πύλης V_g. β) Να υπολογιστεί ο χρόνος διέλευσης ενός ηλεκτρονίου από την μια επαφή στην άλλη. γ) Εάν διπλασιαστεί το μήκος του καναλιού θα αλλάξει η αγωγιμότητα; Θεωρείστε ότι ο ρυθμός διαφυγής προς τις δύο επαφές είναι ο ίδιος. $\hbar = 6{,}6\times10^{-16}\,eV-\sec$

Λύση:

Θεωρούμε ότι το υψηλό δυναμικό της τάσης V_{DS} είναι συνδεμένο στο drain. Από τη γ. παράσταση φαίνεται πως όταν εφαρμόζεται τάση -1V στην πύλη, το ρεύμα αυξάνεται σταθερά για τάση V_{DS} κοντά στα 0V. Αντίθετα για τάση πύλης 0V, το ρεύμα είναι μηδέν μέχρι τα 100mV περίπου της τάσης V_{DS}. Επομένως στην πρώτη περίπτωση (V_G=-1V) η ενεργειακή κατάσταση βρίσκεται πολύ κοντά στο κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των επαφών S & D (λιγότερο από 25meV). Στην δεύτερη περίπτωση (V_G=0V) η ενεργειακή κατάσταση απέχει από το κοινό ηλ/χημ. δυναμικό περίπου 200mV. Αφού η αρνητική τάση στην πύλη μετατοπίζει τις ενεργειακές καταστάσεις του καναλιού προς τα πάνω επομένως τα ενεργειακά διαγράμματα είναι τα ακόλουθα.

V_g=0V	V_g=-1V
	
	

β) Ο ρυθμός διαφυγής είναι $\frac{\gamma}{\hbar}$ επομένως το ένα ηλεκτρόνιο θα μπαίνει (βγαίνει) σε $\frac{\hbar}{\gamma}$ sec.

Ο συνολικός χρόνος κίνησης (από την αριστερή στη δεξιά επαφή) θα είναι $2\dfrac{\hbar}{\gamma}$. Η μία ενεργειακή κατάσταση μπορεί να εποικιστεί από 2 το πολύ ηλεκτρόνια, ένα με σπιν επάνω και ένα με σπιν κάτω. Επομένως το μέγιστο ρεύμα (80pA με βάση την χαρακτηριστική που δίνεται) θα είναι:

$$i = \frac{2q}{2\hbar/\gamma} = \frac{q\gamma}{\hbar}$$

Εισάγοντας τις τιμές στην εξίσωση προκύπτει:

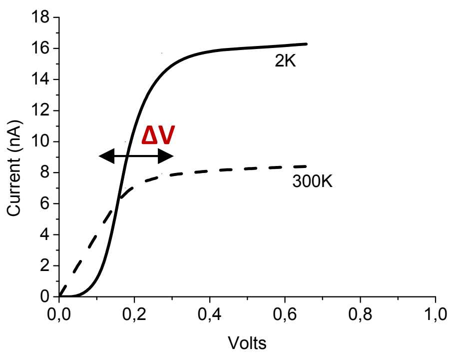
$$\frac{\gamma}{\hbar} = \frac{\iota}{q} = \frac{80\times10^{-12}}{1{,}6\times10^{-19}} = 50\times10^{7} = 5\times10^{8}\eta\lambda/\sec$$

Ο συνολικός χρόνος κίνησης θα είναι:

$$2\frac{\hbar}{\gamma} = \frac{2}{5\times10^{8}} = 4\times10^{-9} = 4n\sec$$

γ) Η αγωγιμότητα μέσα από μια ενεργειακή κατάσταση (παίρνοντας υπόψη το σπιν) είναι $G = 2\dfrac{q^2}{h}$. Η σχέση αυτή δεν εξαρτάται από το μήκος του αγωγού επομένως η αγωγιμότητα δεν θα αλλάξει εάν διπλασιαστεί το μήκος του καναλιού.

Πρόβλημα 6



Στα άκρα ενός μικρού αγωγού δημιουργούνται δύο μεγάλες επαφές με εξάχνωση μετάλλου. Εξηγείστε τις διαφορές στις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης παίρνοντας υπόψη σας την διαφορά στη θερμοκρασία. Υποθέστε ότι υπάρχει μία μόνο ενεργειακή κατάσταση κοντά στο κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών. Πόσα meV απέχει η κατάσταση από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό περίπου; Να υπολογιστεί ο ρυθμός διαφυγής για την περίπτωση των 2K.

Λύση: Με βάση την γραφική παράσταση θα πρέπει να εξηγηθεί η διαφορετική μορφή της χαρακτηριστικής κοντά στα 0Volt.

Στην θερμοκρασία δωματίου τα ηλεκτρόνια έχουν μέση θερμική ενέργεια ίση με 25meV. Εάν λοιπόν η ενεργειακή στάθμη μέσω της οποίας γίνεται η αγωγή, απέχει από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό των δύο επαφών ενέργεια της τάξης των 25meV, τότε τα ηλεκτρόνια θα μπορούν να υπερκαλύψουν αυτή την διαφορά ακόμα και για πολύ μικρές τιμές της τάσης μεταξύ των δύο επαφών. Για τον λόγο αυτό το ρεύμα θα παίρνει μη μηδενικές τιμές στην περιοχή των 0V. Αντίθετα, όταν η μέτρηση γίνεται κοντά στους 0K τα ηλεκτρόνια θα έχουν πολύ μικρή θερμική ενέργεια οπότε θα χρειάζονται τα 25meV (τα δίνει η τάση) για να πατήσουν επάνω στην ενεργειακή κατάσταση του καναλιού και να περάσουν στην απέναντι επαφή.

$$\frac{\gamma}{\hbar}=\frac{\iota}{q}=\frac{16\times10^{-9}}{1{,}6\times10^{-19}}=10^{11}\eta\lambda\varepsilon\kappa\tau\,/\,\mathrm{sec}$$