

Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης για μεγάλες τιμές της τάσης

Η εξίσωση $I = \frac{q}{h} \int \frac{\gamma}{2} dE \cdot D(E)[f_1(E) - f_2(E)]$ δουλεύει καλά για μικρές τιμές της τάσης

V , τυπικά μέχρι 1Volt. Για μικρές τιμές της τάσης και για την περίπτωση που η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων είναι σταθερή η εξίσωση αυτή καταλήγει στην εξής

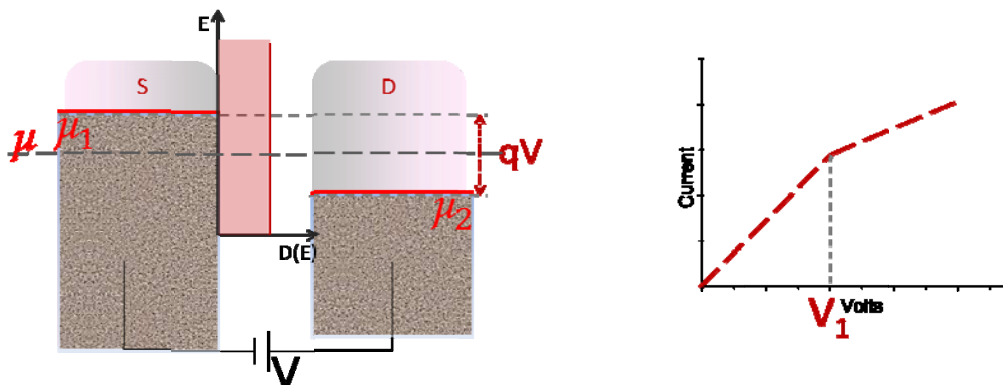
$$\text{έκφραση της αγωγιμότητας } G = \frac{q^2}{h} \pi D \gamma .$$

Τους δούμε τι γίνεται για μεγαλύτερες τάσεις. Στην κατάσταση ισορροπίας δηλαδή όταν η τάση μεταξύ των δύο επαφών είναι μηδέν υπάρχει ένα κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό μ .

Όταν η τάση μεταξύ των επαφών πάρει κάποια τιμή V , το ηλεκτροχημικό δυναμικό τους επαφής D κατεβαίνει κατά $\frac{qV}{2}$ ενώ το ηλεκτροχημικό δυναμικό τους επαφής S ανεβαίνει

κατά $\frac{qV}{2}$ έτσι ώστε η μεταξύ τους απόσταση να είναι $q \cdot V$ όπου V η τάση μεταξύ των δύο

επαφών και q το φορτίο του ηλεκτρονίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Το ενεργειακό διάγραμμα ζωνών όταν η πυκνότητα καταστάσεων στο κανάλι είναι σταθερή και η τάση μεταξύ των δύο επαφών είναι V (αριστερά). Μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει της τάσης μεταξύ των επαφών (δεξιά).

Καθώς η τάση αυξάνεται προστίθενται νέες καταστάσεις στο παράθυρο των μ_1 και μ_2 τόσο από την πλευρά της επαφής S όσο και από την πλευρά της επαφής D. Αυτό συνεχίζεται μέχρι την τιμή τάσης V_1 (Σχήμα 1, δεξιά) όπου το ηλεκτροχημικό δυναμικό μ_2 φτάνει στο κάτω όριο της ζώνης των ενεργειακών καταστάσεων του καναλιού. Από εκεί και πέρα μόνο η επαφή S προσθέτει νέες καταστάσεις, καθώς αυξάνεται η τάση και για τον λόγο αυτό το ρεύμα αυξάνεται με μισό ρυθμό από ότι προηγουμένως. Η μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει της τάσης φαίνεται στη γραφική παράσταση του Σχήματος 1.

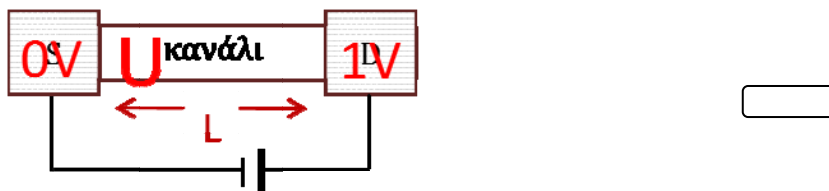
Δυναμικό του καναλιού όταν είναι γειωμένη η μία επαφή.

Περιγραφή του προβλήματος

Μέχρι τώρα υποθέσαμε ότι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις επαφές S και D έχει σαν αποτέλεσμα την ίση μετατόπιση των ηλεκτροχημικών δυναμικών προς τα πάνω για το S και προς τα κάτω για το D. Αν θεωρήσουμε ότι το ηλεκτρόδιο S είναι συνδεδεμένο με την γείωση τότε εφαρμόζοντας μια διαφορά δυναμικού 1Volt ανάμεσα στο S και το D, το ηλεκτροχημικό δυναμικό του S θα κρατηθεί ακίνητο στο δυναμικό της γείωσης 0V, ενώ το ηλεκτροχημικό δυναμικό του D θα κατέβει κατά 1eV. Με τη συλλογιστική αυτή όμως κανείς θα πρέπει να λάβει υπόψη και το γεγονός ότι η ζώνη αγωγιμότητας του καναλιού θα γλιστρήσει προς τα κάτω κατά μισό eV περίπου. Οι δύο οπτικές αυτές είναι ισοδύναμες και η χαρακτηριστική του τρανζίστορ δεν παρουσιάζει κορεσμό.

Αυτό που θα κάνουμε στη συνέχεια είναι να υποθέσουμε ότι η επαφή S είναι συνδεδεμένη στη γείωση και θα προσπαθήσουμε να βρούμε την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης. Μέχρι τώρα δεχτήκαμε ότι εκτός ισορροπίας, όταν δηλαδή εφαρμόζεται μια τάση V μεταξύ των επαφών S και D, τα ηλεκτροχημικά δυναμικά μετατοπίζονται εξίσου σε σχέση με το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν οι επαφές που σχηματίζει το κανάλι με τα S και D είναι εντελώς ίδιες. Όταν λέμε εντελώς ίδιες εννοούμε ότι οι ενέργειες διαφυγής είναι ίσες $\gamma_1 = \gamma_2$ και επιπλέον οι χωρητικότητες του καναλιού με τις επαφές S και D είναι ίσες. Όπως θα δούμε παρακάτω όταν αυτό δεν συμβαίνει, τα ηλεκτροχημικά δυναμικά των δύο επαφών δεν μετακινούνται εξίσου σε σχέση με το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό.

Συνδέουμε το ηλεκτρόδιο S με την γείωση, αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρόδιο S βρίσκεται σταθερά σε δυναμικό μηδέν. Ας υποθέσουμε για παράδειγμα ότι συνδέουμε τις δύο επαφές με μια μπαταρία 1Volt, το χαμηλό δυναμικό στην επαφή S, τότε το δυναμικό στο D θα είναι 1Volt. Το ερώτημα είναι ποιο είναι το δυναμικό στο κανάλι.



Σχήμα 2: Η επαφή S είναι γειωμένη και η επαφή D έχει δυναμικό 1Volt. Το κανάλι θεωρείται ότι είναι αρκούντως μικρό ώστε να έχει σε όλα τα σημεία του το ίδιο δυναμικό (αριστερά). C_s και C_d είναι οι χωρητικότητες καναλιού-επαφής S και καναλιού-επαφής D αντίστοιχα.

Προφανώς το δυναμικό στο κανάλι θα είναι διαφορετικό για το άκρο που βρίσκεται κοντά στο S απ' ότι για το άκρο κοντά στο D, εδώ όμως θα θεωρήσουμε ότι το κανάλι είναι αρκετά κοντό έτσι ώστε το δυναμικό του έχει παντού την ίδια τιμή.

Ο ρόλος των χωρητικοτήτων

Μπορούμε να θεωρήσουμε το κανάλι σαν ένα μικρό αγωγό που συνδέεται μέσω δύο πυκνωτών C_s και C_d με τις δύο επαφές. Στην περίπτωση αυτή το δυναμικό του καναλιού θα είναι ένας μέσος όρος των δυναμικών V_s και V_d που θα επηρεάζεται από τις χωρητικότητες C_s και C_d . Ο υπολογισμός προχωράει ως εξής: Οι πυκνωτές C_s και C_d είναι συνδεδεμένοι στη σειρά οπότε έχουν ίσα φορτία $Q_s = Q_d$.

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των πυκνωτών C_s και C_d είναι $(V_{ch} - V_s)$ και $(V_d - V_{ch})$ αντίστοιχα. Οπότε η ισότητα των φορτίων οδηγεί στη σχέση $C_s(V_{ch} - V_s) = C_d(V_d - V_{ch})$.

Από την εξίσωση αυτή κανείς μπορεί να την λύσει ως προς το δυναμικό του καναλιού.

$$C_s V_{ch} - C_s V_s = C_d V_d - C_d V_{ch} \Rightarrow$$

$$C_s V_{ch} + C_d V_{ch} = C_d V_d + C_s V_s \Rightarrow$$

$$V_{ch} = \frac{C_d V_d + C_s V_s}{C_s + C_d}$$

Αφού η επαφή S είναι γειωμένη $V_s = 0$ οπότε το δυναμικό στο κανάλι γίνεται

$$V_{ch} = \frac{C_d V_d}{C_s + C_d} \quad \text{ή} \quad V_{ch} = \frac{1}{\frac{C_s}{C_d} + 1} V_d$$

Επίδραση του λόγου των χωρητικοτήτων στο δυναμικό του καναλιού.

Την τελευταία έκφραση θα μπορούσαμε να την γράψουμε με τη μορφή $V_{ch} = a \cdot V_d$, όπου

$$a = \frac{1}{\frac{C_s}{C_d} + 1}$$

Χωρητικότητες	a	Δυναμικό καναλιού
$C_s = C_d$	$a = 1/2$	Το δυναμικό του καναλιού είναι το μισό από το δυναμικό της επαφής D. Οι καταστάσεις του καναλιού μετατοπίζονται στην ίδια κατεύθυνση με τις καταστάσεις της επαφής D αλλά με μισή ταχύτητα. Η χαρακτηριστική I-V είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στο Σχήμα 1.
$C_s \gg C_d$	$a \approx 0$	Το δυναμικό του καναλιού δεν επηρεάζεται καθόλου από το δυναμικό της επαφής D. Αυτή είναι η περίπτωση ενός καλού transistor όπου το δυναμικό του καναλιού ελέγχεται από το δυναμικό της πύλης. Οι καταστάσεις του καναλιού μένουν ακίνητες.
$C_s \ll C_d$	$a \approx 1$	Το δυναμικό του καναλιού είναι ίσο με το δυναμικό της επαφής D. Οι καταστάσεις του καναλιού μετατοπίζονται μαζί με τις καταστάσεις της επαφής D.

Είναι προφανές ότι για να υπολογίσει κανείς την δυναμική ενέργεια του καναλιού θα πρέπει να πολλαπλασιάσει το δυναμικό με το φορτίο του ηλεκτρονίου δηλ $U_{ch} = qV_{ch}$.

Επειδή το δυναμικό του καναλιού οφείλεται στα δυναμικά των επαφών που

βρίσκονται εξωτερικά του καναλιού θα συμφωνήσουμε να συμβολίζουμε το δυναμικό αυτό σαν $U_{ext} = qV_{ch}$ (παρακάτω θα γίνει πιο ξεκάθαρο γιατί δίνουμε αυτό το όνομα στο δυναμικό του καναλιού) Εάν $C_s = C_d$ τότε το δυναμικό του καναλιού είναι ίσο με το μισό του δυναμικού V_d , δηλαδή $V_{ch} = \frac{1}{2}V_d$ οπότε όταν το δυναμικό V_d αυξάνεται κατά 100mV το δυναμικό του καναλιού αυξάνεται κατά 50mV και οι καταστάσεις γλιστράνε προς τα κάτω κατά 50meV.

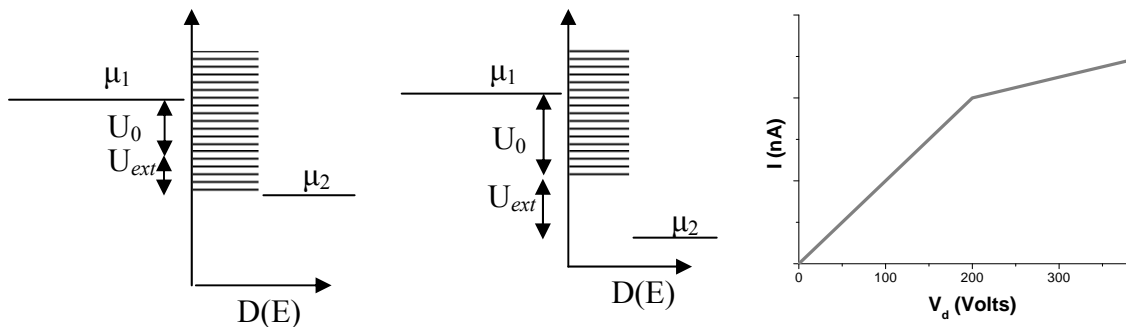
Παράδειγμα:

Ας υποθέσουμε ότι η αριστερή επαφή (S) είναι συνδεδεμένη στη γη. Τότε το δυναμικό της θα είναι σταθερά μηδέν, ενώ το δυναμικό του καναλιού θα καθορίζεται από το δυναμικό στην δεξιά επαφή και το λόγο των χωρητικοτήτων C_s και C_d . Ας πούμε ακόμα ότι οι καταστάσεις του καναλιού βρίσκονται $U_0(eV)$ πιο χαμηλά από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό. Η πυκνότητα καταστάσεων στο κανάλι είναι σταθερή ίση με 1κατάσταση/meV.

Δίνεται ότι: $\frac{C_s}{C_d} = 3$ και ότι $U_0 = 150meV$. Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης μέχρι τάση $V=1V$ olt.

Λύση: Αφού $\frac{C_s}{C_d} = 3$ τότε το δυναμικό στο κανάλι θα είναι $V_{ch} = \frac{1}{\frac{C_s}{C_d} + 1}V_d$ και

αντικαθιστώντας προκύπτει ότι: $V_{ch} = \frac{1}{4}V_d$



Σχήμα 3: Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τάση για την οποία το ηλεκτροχημικό δυναμικό μ_2 ευθυγραμμίζεται με το κάτω άκρο των καταστάσεων του καναλιού (αριστερά). Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης το ρεύμα αυξάνεται εξαιτίας των νέων καταστάσεων που μπαίνουν στο παράθυρο λόγω της ολίσθησης των καταστάσεων του καναλιού προς τα κάτω (μέσο). Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης φαίνεται δεξιά.

Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να υπολογίσουμε την τιμή της τάσης V_d για την οποία το ηλεκτροχημικό δυναμικό μ_2 ευθυγραμμίζεται με το κάτω άκρο των καταστάσεων του καναλιού. Όπως φαίνεται από το σχήμα $U_0 + U_{ext} = qV_d$ οπότε $150 + 0,25V_d q = qV_d$

$$V_d = \frac{150}{0,75} = 200 \text{meV}$$

Επομένως μόλις η τάση στην δεξιά επαφή γίνει 0,2V το κάτω όριο της ζώνης αγωγιμότητας του καναλιού θα ευθυγραμμιστεί με το ηλεκτροχημικό δυναμικό της δεξιάς επαφής.

Μέχρι εκείνη την τιμή (δηλαδή για τιμές της τάσης $V_d < 200\text{mV}$) το ρεύμα μεταβάλλεται

βάσει της σχέση $I = i_{\uparrow\downarrow} \times (\text{πλήθος καταστάσεων}) = \frac{q\gamma}{\hbar} qDV_d$. Από εκεί και πέρα η

απόσταση των ηλεκτροχημικών δυναμικών μεγαλώνει αλλά το πλήθος των καταστάσεων ανάμεσά τους αυξάνεται μόνο κατά τον αριθμό των καταστάσεων που μπαίνουν λόγω της ολίσθησης του καναλιού προς τα κάτω. Όταν το δυναμικό της επαφής D αυξάνεται κατά ΔV_d

το δυναμικό του καναλιού αυξάνεται κατά $\Delta V_{ch} = \frac{1}{4} \Delta V_d$ οπότε το ρεύμα αυξάνεται κατά

$$\Delta I = \frac{q\gamma}{\hbar} qD \Delta V_{ch} \text{ ή } \Delta I = \frac{q\gamma}{\hbar} qD \frac{1}{4} \Delta V_d$$

Η κλίση της χαρακτηριστικής ισούται με την αγωγιμότητα. Για τάση έως 200mV η εξίσωση

ρευματος-τάσης είναι $I = \frac{q^2\gamma}{\hbar} DV_d$, οπότε η αγωγιμότητα θα είναι $G = \frac{I}{V_d} = \frac{q^2\gamma}{\hbar} D$

Για μεγαλύτερες τιμές τάσης η εξίσωση ρευματος-τάσης είναι $\Delta I = \frac{q^2\gamma}{\hbar} D \frac{1}{4} \Delta V_d$, οπότε η

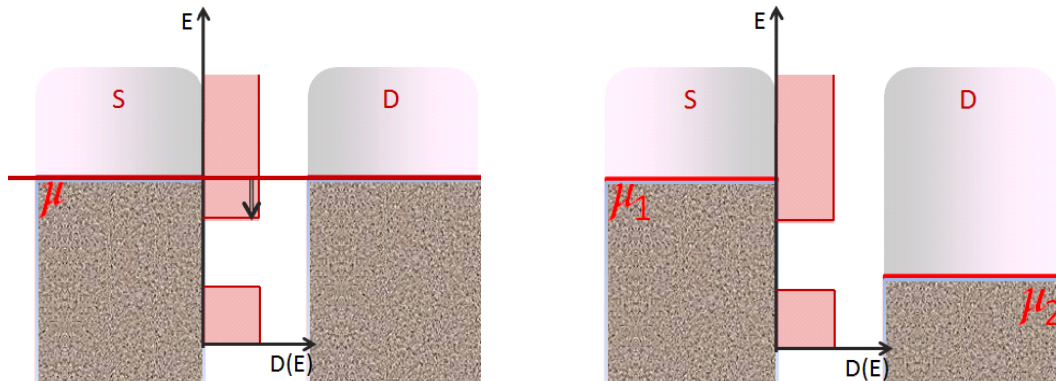
αγωγιμότητα θα είναι $G = \frac{\Delta I}{\Delta V_d} = \frac{1}{4} \frac{q^2\gamma}{\hbar} D$.

Η χαρακτηριστική ενός καλού transistor

Αυτό που θα θέλαμε στην περίπτωση ενός καλού τρανζίστορ είναι να εμφανίζεται κορεσμός στην χαρακτηριστική ρευματος-τάσης. Στα πλαίσια της παρουσίασης που προηγήθηκε αυτό σημαίνει:

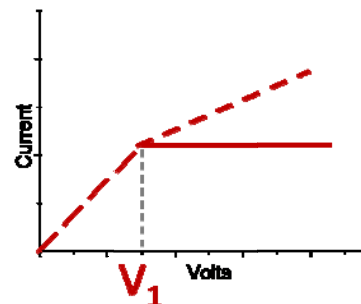
- το ηλεκτροχημικό δυναμικό της επαφής S να παραμένει ακίνητο
- ολόκληρη η εφαρμοζόμενη τάση να προκαλεί την μετατόπιση του ηλεκτροχημικού δυναμικού της επαφής D μόνο, και
- οι καταστάσεις του καναλιού να μην ολισθαίνουν προς τα κάτω καθώς αυξάνεται η τάση μεταξύ των επαφών S και D.

Εάν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης θα εμφανίζει κορεσμό για μεγάλες τάσεις με βάση τον εξής συλλογισμό:



Σχήμα 4: Η αριστερή επαφή είναι συνδεδεμένη στη γείωση οπότε σε κατάσταση ισορροπίας οι επαφές S και D έχουν κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό $0eV$ (αριστερά). Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης φτάνει σε κορεσμό όταν μόνο εάν η αύξηση του δυναμικού της δεξιάς επαφής δεν μεταβάλλει το δυναμικό του καναλιού.

Στην κατάσταση ισορροπίας δηλαδή όταν η τάση μεταξύ των επαφών S και D είναι μηδέν υπάρχει ένα κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό μ . Εφόσον η επαφή S είναι γειωμένη το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό θα είναι $0eV$. Καθώς η τάση μεταξύ των επαφών αυξάνεται το ηλεκτροχημικό δυναμικό μ_2 κατεβαίνει αυξάνοντας τον αριθμό των καταστάσεων που συμμετέχουν στην αγωγή. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει της τάσης. Δεχόμαστε ότι με κάποιον τρόπο έχουμε καταφέρει τα πράγματα έτσι ώστε η αύξηση του δυναμικού στην δεξιά επαφή να μην αυξάνει το δυναμικό του καναλιού, δηλαδή οι καταστάσεις του καναλιού δεν γλιστράνε προς τα κάτω. Για κάποια τιμή της τάσης το ηλεκτροχημικό δυναμικό της επαφής D φτάνει στο όριο της ζώνης αγωγιμότητας του καναλιού από κει και πέρα όταν αυξάνεται η τάση το ηλεκτροχημικό δυναμικό συνεχίζει να κατεβαίνει χωρίς όμως να προστίθενται νέες καταστάσεις στο παράθυρο που ορίζουν τα δύο ηλεκτροχημικά δυναμικά. Δηλαδή από κάποια τιμή της τάσης και μετά το πλήθος των καταστάσεων που συμμετέχουν στο μηχανισμό της αγωγιμότητας παραμένει σταθερός οπότε το ρεύμα σταματάει να αυξάνεται και στην χαρακτηριστική αυτό εμφανίζεται σαν κορεσμός.



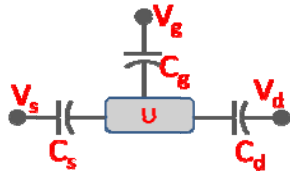
Σχήμα 5: Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης σε ένα transistor θέλουμε να φτάνει σε κορεσμό σε μεγάλες τάσεις (συμπαγής γραμμή). Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του δυναμικού του καναλιού από το ηλεκτρόδιο της πύλης. Η δυσκολία με τα νανο-transistors έγκειται στη δυσκολία να ελεγχθεί το δυναμικό του καναλιού οπότε η χαρακτηριστική δεν παρουσιάζει κορεσμό (διακεκομμένη γραμμή)

Από την πλευρά της τεχνολογίας το ερώτημα είναι πως θα πετύχουμε το δυναμικό του καναλιού να μην επηρεάζεται από το δυναμικό της επαφής D. Η απάντηση είναι η εξής: το δυναμικό του καναλιού θα ελέγχεται απόλυτα από την τάση του ηλεκτροδίου της πύλης. Εάν το ηλεκτρόδιο της πύλης είναι πάρα πολύ κοντά στο κανάλι τότε θα επιβάλλει το δυναμικό του στο κανάλι και η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια S και D δεν θα επιδρά στο δυναμικό του καναλιού. Αυτή ακριβώς είναι η συμπεριφορά της πύλης που θέλουμε να έχει σε ένα καλό τρανζίστορ. Στην περίπτωση αυτή η ζώνη αγωγιμότητας του καναλιού παραμένει ακίνητη στο ενεργειακό διάγραμμα ανεξάρτητα από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις επαφές S και D.

Η δυσκολία με τα νανο-transistors έγκειται στη υλοποίηση διατάξεων που θα λειτουργούν με αυτό τον τρόπο. Εκεί ακριβώς βρίσκεται η δυσκολία στην υλοποίηση καλών νανο-transistors. Εάν για παράδειγμα το μήκος του καναλιού είναι περίπου 500 άτομα για να μπορεί η πύλη να ελέγχει ηλεκτροστατικά το κανάλι να πρέπει σύμφωνα με τον πρακτικό κανόνα το πάχος του οξειδίου της πύλης να είναι 1/50 του μήκους του καναλιού, δηλαδή περίπου 10 άτομα. Οπότε με αυτό το πάχος θα υπάρχουν ρεύματα διαρροής από τη πύλη προς το κανάλι πράγμα που είναι ανεπιθύμητο. Αν αντίθετα το πάχος του οξειδίου της πύλης είναι 200 άτομα τότε δεν θα υπάρχουν ρεύματα διαρροής, όμως το δυναμικό του καναλιού δεν θα ελέγχεται ηλεκτροστατικά από την πύλη και η χαρακτηριστική του τρανζίστορ θα είναι σαν αυτή του σχήματος 3, δηλ. δεν θα φτάνει σε κορεσμό.

Σε ένα καλό transistor η πύλη πρέπει να έχει μεγάλη χωρητικότητα.

Στη συνέχεια θα επιδιώξουμε να δούμε την ποσοτική έκφραση της παραπάνω συζήτησης. Θα ακολουθήσουμε την ίδια λογική με την περίπτωση που εξετάζαμε την επίδραση του δυναμικού των επαφών S και D στο δυναμικό του καναλιού. Δεχόμαστε ότι το κανάλι είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε το δυναμικό του έχει παντού την ίδια τιμή. Μπορούμε να θεωρήσουμε το κανάλι σαν ένα μικρό αγωγό που συνδέεται μέσω δύο πυκνωτών C_s και C_d και C_g με τις επαφές S, D και G. Στην περίπτωση αυτή το δυναμικό του καναλιού θα είναι ένας μέσος όρος των δυναμικών V_s , V_d και V_g που θα επηρεάζεται από τις χωρητικότητες C_s , C_d και C_g .



Σχήμα 6: Θεωρούμε πως το κανάλι είναι αρκούντως μικρό και έχει μια τιμή δυναμικής ενέργειας. Οι επαφές καναλιού-ηλεκτροδίων S, D και G έχουν χωρητικότητες C_s , C_d και C_g αντίστοιχα.

Στην περίπτωση αυτή και σε αναλογία με την περίπτωση των δύο επαφών, το

δυναμικό του καναλιού προκύπτει από την εξίσωση $V = \frac{C_s V_s + C_g V_g + C_d V_d}{C_s + C_g + C_d}$,

αλλά $V_s = 0$, οπότε

$$V = \frac{C_g V_g + C_d V_d}{C_s + C_g + C_d} = \frac{C_g V_g + C_d V_d}{C_T}, \text{ όπου } C_T = C_s + C_g + C_d$$

$$U_{ext} = -q \cdot V = -q \cdot \frac{C_g V_g + C_d V_d}{C_T}$$

Εάν λοιπόν τα δυναμικά στα τρία ηλεκτρόδια S, D και G παίρνουν διαφορετικές τιμές τότε μπορεί να υπολογιστεί το δυναμικό του καναλιού. Εάν η χωρητικότητα καναλιού-πύλης είναι πολύ μεγάλη τότε η δυναμική ενέργεια του καναλιού θα καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το δυναμικό της πύλης και αυτός είναι ακριβώς ο στόχος στο επίπεδο της τεχνολογίας. Ένα τρόπος να πετύχουμε μεγάλη χωρητικότητα στην πύλη είναι να κάνουμε το οξειδίο της πύλης πάρα πολύ λεπτό. Ένας άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν διηλεκτρικά μεγάλου K. Δηλαδή υλικά με πολύ μεγάλη διηλεκτρική σταθερά π.χ. 100. Η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου του πυριτίου είναι περίπου 4. Εάν η διηλεκτρική σταθερά είναι 40 τότε το πάχος του οξειδίου μπορεί να γίνει δεκαπλάσιο και η χωρητικότητα να είναι πάλι μεγάλη. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να λυθεί το πρόβλημα των ρευμάτων διαρροής. Στα σύγχρονα τρανζίστορ χρησιμοποιούνται υλικά μεγάλου K και αυτό αποτελεί μία πολύ μεγάλη αλλαγή σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνολογία, γιατί ένας από τους λόγους που αναπτύχθηκε η τεχνολογία του πυριτίου ήταν ακριβώς η πολλές καλές και ελεγχόμενες ιδιότητες του οξειδίου του πυριτίου σαν διηλεκτρικό.

Επίδραση του δυναμικού του καναλιού στη χαρακτηριστική I-V.

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να δούμε την επίδραση που έχει το δυναμικό του καναλιού στο ρεύμα που περνάει από το S στο D. Ας υποθέσουμε ότι το δυναμικό του καναλιού είναι U. Ανάλογα με την τιμή του, η ζώνη αγωγιμότητας θα μετατοπίζεται προς τα πάνω η προς τα κάτω και αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην εξίσωση του ρεύματος. Να διευκρινίσουμε ότι το U είναι δυναμική ενέργεια και μετριέται σε eV ενώ

V είναι η διαφορά δυναμικού και μετριέται σε Volt. Όταν η διαφορά δυναμικού είναι θετική τότε η δυναμική ενέργεια είναι αρνητική. Εάν λοιπόν η δυναμική ενέργεια U είναι θετική τότε η πυκνότητα καταστάσεων στην ζώνη αγωγιμότητας θα μετατοπιστεί προς τα πάνω. Εφόσον η ζώνη αγωγιμότητας μετατοπίζεται προς μεγαλύτερες τιμές κατά U τότε η νέα έκφραση για την μετατοπισμένη πυκνότητα καταστάσεων θα είναι $D(E-U)$. Έτσι η εξίσωση της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης θα γίνει

$$I = \frac{q}{\hbar} \int \frac{\gamma}{2} dE \cdot D(E-U)[f_1(E) - f_2(E)].$$

Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου

Το επόμενο βήμα είναι ο πλήρης προσδιορισμός της ποσότητας U . Η δυναμική ενέργεια του καναλιού θα ήταν ακριβώς ίση με U_{ext} μόνο στην περίπτωση που δεν θα έμπαιναν και έβγαιναν ηλεκτρόνια στο και από το κανάλι, δηλαδή εάν το κανάλι ήταν ένας μονωτής. Τώρα που τα ηλεκτρόνια περνάνε από την μία επαφή στην άλλη μέσω του καναλιού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη του το πλήθος των ηλεκτρονίων που βρίσκονται κάθε στιγμή μέσα στο κανάλι. Η δυναμική ενέργεια του καναλιού μπορεί να εκφραστεί σαν άθροισμα δύο προσθετέων $U = U_{ext} + U_{ee}$.

Ας δούμε πως προκύπτει ο δεύτερος προσθετέος U_{ee} . Ξεκινάμε με την παραδοχή ότι έχουμε μια πολύ καλή πύλη έτσι ώστε όταν εφαρμόζεται μία θετική τάση στο ηλεκτρόδιο D η πυκνότητα καταστάσεων του καναλιού δεν μετατοπίζεται καθόλου και αυτό γιατί η δυναμική ενέργεια U του καναλιού ελέγχεται απόλυτα από την τάση της πύλης. Στην περίπτωση αυτή το μέγιστο ρεύμα είναι ίσο με το ρεύμα που επιτρέπει ο αριθμός των καταστάσεων που βρίσκονται ανάμεσα στο παράθυρο των S και D. Στην πραγματικότητα το ρεύμα είναι λίγο μεγαλύτερο και αυτό θα εξηγήσουμε στην συνέχεια. Στην κατάσταση ισορροπίας όλες οι καταστάσεις που βρίσκονται κάτω από το κοινό ηλεκτροχημικό δυναμικό είναι γεμάτες. Όταν αυτές οι ενεργειακές καταστάσεις έρχονται μέσα στο παράθυρο των ηλεκτροχημικών δυναμικών του S και D θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι μισογεμάτες ή αλλιώς ότι ο βαθμός κατάληψής τους είναι 50%. Εάν λοιπόν στην κατάσταση ισορροπίας υπήρχαν 100 ηλεκτρόνια μέσα στο κανάλι, μετά την εφαρμογή τάσης θα υπάρχουν 50 ηλεκτρόνια. Εξαιτίας του μικρότερου αριθμού ηλεκτρονίων το δυναμικό του καναλιού γίνεται πιο θετικό οπότε οι καταστάσεις στο κανάλι θα γλιστρήσουν προς τα κάτω. Αυτό το στοιχείο δεν μπορεί να προβλεφθεί από τον υπολογισμό του U_{ext} με τις

χωρητικότητες που αναφέραμε προηγουμένως. Πόσο θα γλιστρήσουν προς τα κάτω οι καταστάσεις του καναλιού; τόσο ώστε με μισό βαθμό κατάληψης να περιλαμβάνουν 100 ηλεκτρόνια που θα εξισορροπούν τα θετικά φορτία των πυρήνων. Άραξ και γίνει αυτό θα σταματήσουν να γλιστράνε προς τα κάτω. Αυτό έχει σαν συνέπεια το ρεύμα κορεσμού να είναι λίγο μεγαλύτερο απ' ότι υποθέσαμε προηγουμένως, στην πραγματικότητα θα είναι περίπου διπλάσιο. Αυτό είναι λογικό αν κανείς υποθέσει ότι με βαθμό κατάληψης 50% θα χρειάζεται διπλάσιο αριθμό καταστάσεων για να χωρέσουν 100 ηλεκτρόνια και να παραμείνει το κανάλι ουδέτερο.

Στο παράδειγμα που αναφέραμε το πλήθος των ηλεκτρονίων σε κατάσταση ισορροπίας είναι 100, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η διαφορά $(N - N_{ισορ})$. Η συνολική δυναμική ενέργεια θα είναι $U_0(N - N_{ισορ})$ όπου U_0 είναι η δυναμική ενέργεια του ενός ηλεκτρονίου. Εάν λοιπόν το ένα ηλεκτρόνιο αλλάζει την δυναμική ενέργεια κατά 1μeV τότε η συνολική μεταβολή της δυναμικής ενέργειας θα είναι: $U_0(N - N_{ισορ})$

$$U = U_{ext} + U_0(N - N_{ισορ})$$

Ο όρος αυτός περιγράφει την δυναμική ενέργεια του καναλιού περιλαμβάνοντας και την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων μεταξύ τους. Θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι το δυναμικό U_{ext} προκαλείται από φορτία που συσσωρεύονται στις διεπαφές του καναλιού με τα τρία ηλεκτρόδια ενώ ο δεύτερος όρος οφείλεται σε φορτία που βρίσκονται μέσα στο κανάλι. Το τελευταίο ερώτημα είναι να βρεθεί ο αριθμός των ηλεκτρονίων που περιέχονται στο κανάλι.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο κανάλι προκύπτει σαν γινόμενο του πλήθους των διαθέσιμων καταστάσεων επί τον βαθμό κατάληψης.

Το πλήθος των καταστάσεων σε ενεργειακό διάστημα dE είναι $D(E) \cdot dE$.

Ο βαθμό κατάληψης στην περίπτωση που ένα υλικό βρίσκεται σε ισορροπία δίνεται από την συνάρτηση Fermi. Εάν λοιπόν μιλούσαμε για την επαφή S θα λέγαμε ότι ο αριθμός ηλεκτρονίων σε μια ενεργειακή περιοχή dE θα ήταν $D(E) \cdot dE \cdot f_1(E)$.

Όμως το κανάλι δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας γιατί υπάρχουν ηλεκτρόνια που μπαίνουν από την μια επαφή και βγαίνουν στην άλλη. Στην περίπτωση που οι συντελεστές διαφυγής των ηλεκτρονίων στις επαφές είναι ίσοι η συνάρτηση Fermi του καναλιού θα

είναι $f_{ch}(E) = \frac{f_1(E) + f_2(E)}{2}$. Αντίθετα, όπως θα δούμε παρακάτω, όταν οι

συντελεστές διαφυγής δεν είναι ίσοι $\gamma_1 \neq \gamma_2$, η συνάρτηση Fermi του καναλιού θα είναι

$f_{ch}(E) = \frac{\gamma_1 f_1(E) + \gamma_2 f_2(E)}{2}$ και το πλήθος των ηλεκτρονίων στο κανάλι θα είναι

$$N = \int dE \cdot D(E) \cdot f_{ch}(E).$$

Ο υπολογισμός του ρεύματος στην περίπτωση που οι συντελεστές διαφυγής είναι ίσοι $\gamma_1 = \gamma_2$ γίνεται επιλύοντας ταυτόχρονα τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I = \frac{q}{\hbar} \int \frac{\gamma}{2} dE \cdot D(E - U) [f_1(E) - f_2(E)]$$

$$U = U_{ext} + U_0 (N - N_{ισορ})$$

$$N = \int dE \cdot D(E) \cdot \frac{f_1(E) + f_2(E)}{2}$$