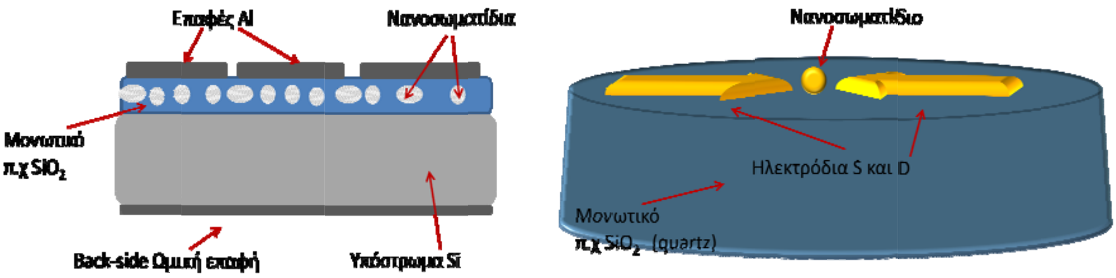
Φραγή Coulomb σε διατάξεις που περιέχουν νανοσωματίδια.

I. Φραγή Coulomb σε διατάξεις που περιέχουν μεταλλικά νανοσωματίδια

1. Περιγραφή των διατάξεων

Μια διάταξη που περιέχει νανοσωματίδια μπορεί να αναπτυχθεί κατακόρυφα δηλαδή να είναι της μορφής MIS (metal-insulator-semiconductor) ή σε επίπεδη μορφή. Όταν λέμε κατακόρυφα εννοούμε ότι έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1α. Επάνω σε ένα αγώγιμο (π.χ. Al) ή ημιαγώγιμο (π.χ. Si) υπόστρωμα αναπτύσσεται ένα λεπτό μονωτικό στρώμα. Για την περίπτωση του υποστρώματος Si θα μπορούσε να είναι ένα λεπτό (1-4nm) θερμικό οξείδιο του πυριτίου. Σε τέτοια πάχη το οξείδιο δεν είναι και τόσο μονωτικό με την έννοια πως αν δημιουργήσουμε δύο ηλεκτρόδια (σαν σάντουιτς με το οξείδιο) και εφαρμόσουμε τάση μερικών volt θα περάσει ρεύμα. Τα ηλεκτρόνια περνάνε μέσα από το διηλεκτρικό με φαινόμενο σήραγγας.

Επάνω στο μονωτικό στρώμα εναποθέτουμε τα μεταλλικά νανοσωματίδια και στη συνέχεια τα σκεπάζουμε με ένα δεύτερο στρώμα διηλεκτρικού. Το δεύτερο διηλεκτρικό θα μπορούσε να είναι οξείδιο του πυριτίου ή νιτρίδιο του πυριτίου το οποίο έχει εναποτεθεί με ιοντοβολή (η περίπτωση θερμικών διεργασιών αποκλείεται γιατί τα μεταλλικά νανοσωματίδια θα μόλυναν τον φούρνο). Στη συνέχεια δημιουργούνται μεταλλικές επαφές (με εξάχνωση Al).



1(α) 1(β)

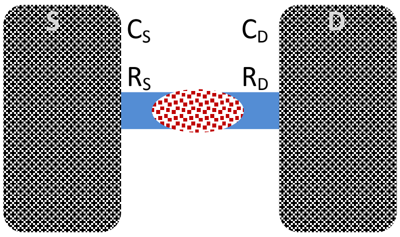
Σχήμα 1: Διατάξεις που περιέχουν νανοσωματίδια. Αριστερά σε κατακόρυφη ανάπτυξη και δεξιά σε οριζόντια.

Μια μορφή επίπεδης διάταξης (planar) φαίνεται στο σχήμα 1β. Στην περίπτωση αυτή πρέπει κανείς να δημιουργήσει δύο ηλεκτρόδια (το source & το drain) και ανάμεσά τους να τοποθετήσει τα νανοσωματίδια. Το διάκενο ανάμεσα στα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι μερικές δεκάδες nm πράγμα που μπορεί να γίνει μόνο με λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης.

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την σχηματική μορφή μιας διάταξης στην οποία τα ηλεκτρόνια περνάνε από την επαφή S στο νανοσωματιδίο και από εκεί στην επαφή D. Το φαινόμενο της φραγής Coulomb ερμηνεύεται καλά με την χρήση του κλασσικού ηλεκτρομαγνητισμού. Ο λόγος που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον μας τα τελευταία χρόνια είναι ότι έχουμε μάθει να φτιάχνουμε νανοσωματίδια, ηλεκτρόδια που απέχουν μερικές δεκάδες nm και άλλα τέτοια εντυπωσιακά τα οποία δεν ήταν εύκολα διαθέσιμα πριν 30 χρόνια. Υπάρχουν 4 θέματα που θα πρέπει να θυμάται κανείς:

1) Το πρώτο αφορά στην σύνδεση της πηγής τάσης ανάμεσα στα ηλεκτρόδια S και D. Θα συμφωνήσουμε ότι συνδέουμε τον αρνητικό πόλο στο S και τον θετικό πόλο στο D.

2) Το δεύτερο έχει να κάνει με την ηλεκτρική σύζευξη του νανοσωματιδίου με τα ηλεκτρόδια S και D. Ανάμεσα στο νανοσωματίδιο και το ηλεκτρόδιο S για παράδειγμα, παρεμβάλλεται ένας μονωτής. Αυτό που περιμένει κανείς είναι πως το σύστημα νανοσωματίδιο-επαφή S θα συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής. Πράγματι αυτό είναι αλήθεια και μάλιστα ένα από τα ερωτήματα που θα μάθουμε να απαντάμε είναι ακριβώς ο υπολογισμός της χωρητικότητας αυτής. Επειδή όμως το οξείδιο είναι πολύ λεπτό υπάρχει ένα ασθενές ρεύμα που περνάει από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο διαμέσου του νανοσωματιδίου. Με αυτή την οπτική το σύστημα ηλεκτρόδιο-νανοσωματίδιο συμπεριφέρεται και σαν αντίσταση. Θα λέμε ότι το σύστημα νανοσωματίδιο-ηλεκτρόδιο S έχει αντίσταση R_S και χωρητικότητα C_S. Αντίστοιχα συμβαίνει για το δεύτερο ηλεκτρόδιο. Οι επαφές S και D είναι συμμετρικές όταν:



Σχήμα 2: Σχηματική μορφή διάταξης στην οποία η αγωγή από το S στο D γίνεται μέσω ενός νανοσωματιδίου.

$C_S = C_D$ και $R_s = R_D$ (1)

ή όταν $R_S \cdot C_S = R_D \cdot C_D$ (2)

Οι εξισώσεις (1) λένε το προφανές, ότι οι επαφές S και D είναι συμμετρικές όταν είναι πανομοιότυπες. Όμως, ποια είναι η ερμηνεία της ισότητας (2); Το πρώτο που πρέπει να θυμηθεί κανείς είναι ότι το γινόμενο R·C έχει διαστάσεις χρόνου! Θυμηθείτε ότι στην μελέτη της φόρτισης ενός πυκνωτή ονομάζουμε το γινόμενο $\tau = R \cdot C$ σταθερά χρόνου φόρτισης. Το γινόμενο R·C στην εξίσωση (2) αποτελεί ένα μέτρο του χρόνου που μας δείχνει κάθε πότε ένα ηλεκτρόνιο ξεκινάει να περάσει από το ηλεκτρόδιο S στο νανοσωματίδιο. Κατά συνέπεια η εξίσωση (2) λέει πως όταν αυτοί οι χρόνοι είναι ίσοι, τότε οι επαφές ονομάζονται συμμετρικές.

3) Το τρίτο ζήτημα που πρέπει να θυμάται κανείς αφορά την ποιότητα της ηλεκτρικής επαφής ανάμεσα στο νανοσωματιδίου και τις επαφές S και D. Για να εμφανιστεί φραγή Coulomb πρέπει το νανοσωματίδιο να έχει πολύ ασθενή επικοινωνία με τις επαφές ή αλλιώς οι αντιστάσεις R_S και R_D πρέπει να είναι μεγάλες. Τυπικές τιμές είναι από μερικές εκατοντάδες kΩ μέχρι μερικά GΩ.
4) Υπάρχει σημαντική διαφορά στα αποτελέσματα των μετρήσεων I-V ανάλογα με το εάν το νανοσωματίδιο είναι μεταλλικό ή ημιαγώγιμο. Στην περίπτωση του μεταλλικού νανοσωματιδίου τα πράγματα είναι πιο στρωτά και εξηγούνται σε καλό βαθμό με βάση μερικές απλές εξισώσεις από τον ηλεκτρομαγνητισμό. Όταν το νανοσωματίδιο είναι ημιαγωγός (π.χ. πυρίτιο) τότε τα μεγέθη που μετράμε (η χαρακτηριστική I-V) μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο που δεν ερμηνεύεται με την επίκληση της θεωρίας της φραγής Coulomb μόνο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του την διεύρυνση του ενεργειακού χάσματος του

νανοσωματιδίου λόγω του φαινομένου του κβαντικού περιορισμού (quantum confinement). Η περίπτωση αυτή θα συζητηθεί στην άσκηση 18.

2. Χαρακτηριστικές I-V

Η χωρητικότητα μιας μεταλλικής σφαίρας ακτίνας R δίνεται από την εξίσωση:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R$$

Με βάση αυτή την εξίσωση μπορούμε να αποκτήσουμε μια εκτίμηση της τιμής της χωρητικότητας ενός νανοσωματιδίου που έχει ακτίνα 7,2nm.

$C = 4\text{x}3{,}14\text{x}8{,}85\text{x}10^{-12}\text{x}7{,}2\text{x}10^{-9}$=$0{,}8\text{x}10^{-18}$Farad=0,8aF

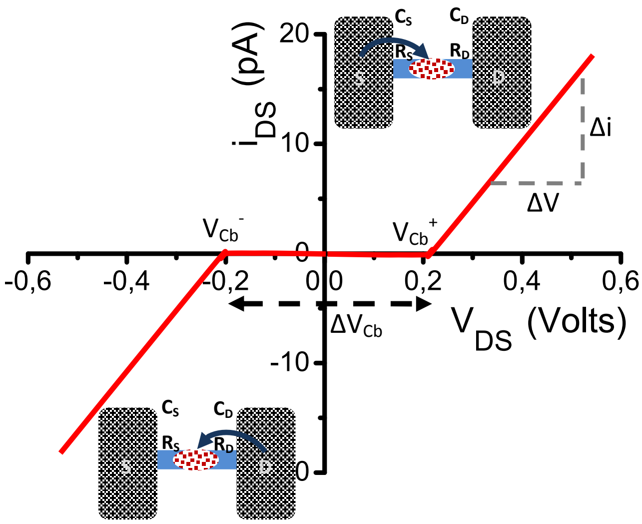
Ας υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρόνιο μπαίνει μέσα στο σωματίδιο αυτό. Τότε θα αποκτήσει δυναμικό

$$V = \frac{q}{C} = \frac{1{,}6x10^{-19}}{0{,}8x10^{-18}} = 0{,}2Volt$$

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι το ηλεκτρόνιο βλέπει το μεταλλικό νανοσωματίδιο σαν μια περιοχή μεγάλης ενέργειας οπότε δεν θα κινηθεί προς τα εκεί παρά μόνο εάν του έχουμε δώσει εμείς μεγαλύτερη ενέργεια –μέσω της εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα θα είναι μηδέν όσο η τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια είναι μικρότερη από 0,2Volt. Με αυτή την απλή προσέγγιση γίνεται κατανοητή η φραγή Coulomb. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την μορφή της χαρακτηριστικής I-V για τρεις περιπτώσεις.

Περίπτωση i: Πανομοιότυπες επαφές

Δηλαδή: C_S=C_D και R_s=R_D. Όταν η τάση ξεπεράσει κάποια τιμή, το ηλεκτρόνιο περνάει από το ηλεκτρόδιο στο νανοσωματίδιο και από εκεί στο άλλο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 3: Χαρακτηριστική I-V για πανομοιότυπες επαφές S και D.

Η μορφή της χαρακτηριστικής I-V φαίνεται στο Σχήμα 3.

Παρατηρήσεις:

Οι κλίσεις των γραμμικών τμημάτων είναι ίδιες

Οι τάσεις φραγής Coulomb είναι ίσες για τις δυο περιπτώσεις πόλωσης, $V_{Cb}^{+} = V_{Cb}^{-}$

Τι μπορούμε να υπολογίσουμε

Την αντίσταση σήραγγας (tunneling resistance) $R_S=R_D=R$ από την κλίση ενός από τα γραμμικά τμήματα των χαρακτηριστικών I-V. Από το σχήμα 3 φαίνεται ότι:

$$R_{ToT} = R_S + R_D = \frac{\Delta V}{\Delta i}$$

Τις χωρητικότητες $C_S=C_D=C$. Για κάποιες τιμές θετικής τάσης V_{DS} το ηλεκτρόνιο περνάει από το ηλεκτρόδιο S στο νανοσωματίδιο και από εκεί στο ηλεκτρόδιο D. Η τάση φραγής Coulomb δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Cb}^{+} = \frac{q}{2C_\Sigma}$$

Όπου $C_\Sigma = C_s + C_D$

Για αρνητικές τιμές της τάσης V_{DS} το ηλεκτρόνιο περνάει αντίστοιχα από το ηλεκτρόδιο D στο S μέσω του νανοσωματιδίου. Η τάση φραγής Coulomb δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Cb}^{-} = \frac{q}{2C_\Sigma}$$

Οι τάσεις φραγής Coulomb είναι ίσες για τις δυο περιπτώσεις πόλωσης, $V_{Cb}^{+} = V_{Cb}^{-}$

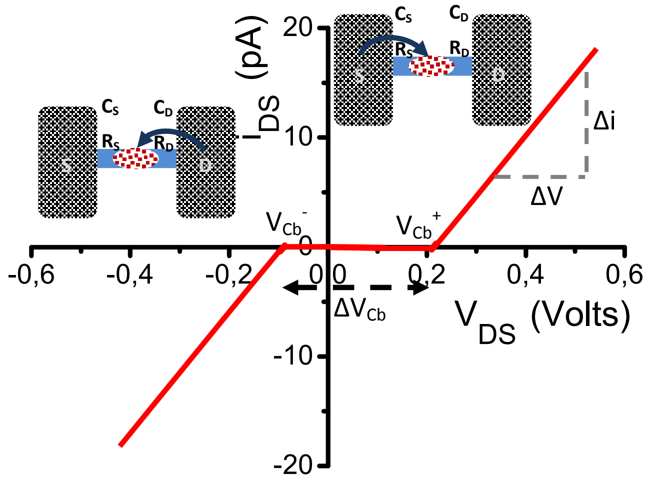
Το επίπεδο τμήμα της χαρακτηριστικής I-V είναι προφανώς το διπλάσιο της φραγής Coulomb, δηλαδή $\Delta V_{Cb}=2V_{Cb}^{+}=2V_{Cb}^{-}$

Περίπτωση ii: Συμμετρικές επαφές αλλά $C_S \neq C_D$

Όταν η τάση ξεπεράσει κάποια τιμή, τα ηλεκτρόνια περνάνε από το ηλεκτρόδιο στο νανοσωματίδιο και από εκεί στο άλλο ηλεκτρόδιο. Η μορφή της χαρακτηριστικής I-V διαφέρει από αυτήν του Σχήματος 3 στο ότι οι τάσεις V_{Cb}^{+} και V_{Cb}^{-} δεν βρίσκονται σε συμμετρικές θέσεις ως προς το μηδέν.

Παρατήρηση:

Η κλίση των γραμμικών τμημάτων δίνει την ολική αντίσταση



Σχήμα 4: Η μη συμμετρική θέση των τάσεων V_{Cb}^{+} και V_{Cb}^{-} αποδίδεται στις άνισες χωρητικότητες C_S και C_D.

Τι μπορούμε να υπολογίσουμε

Την ολική αντίσταση σήραγγας (tunneling resistance) $R_{ToT}= R_S + R_D$ από την κλίση του γραμμικού τμήματος της χαρακτηριστικής I-V.

Τις χωρητικότητες C_S και C_D. Για θετικές τιμές της τάσης V_{DS} το ηλεκτρόνιο περνάει από το ηλεκτρόδιο S στο νανοσωματίδιο. Η τάση φραγής Coulomb δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{Cb} = \frac{q}{C_\Sigma}$$

Από την εξίσωση αυτή προσδιορίζεται η χωρητικότητα C_Σ

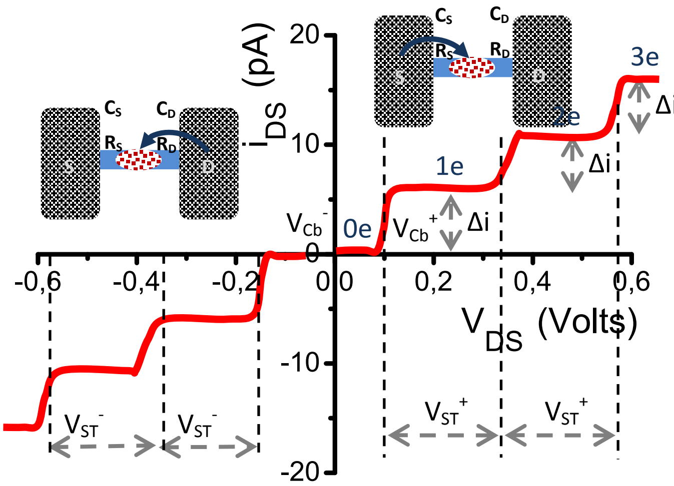
Το επίπεδο τμήμα της χαρακτηριστικής I-V είναι προφανώς ίσο με το άθροισμα των φραγών Coulomb, δηλαδή $\Delta V_{Cb}=V_{Cb}^{+}+|V_{Cb}^{-}|$

Επιπλέον:

$$\frac{V_{Cb}^{+}}{\Delta V_{Cb}} = \frac{C_D}{(C_S+C_D)} \text{ και } \quad \frac{V_{Cb}^{-}}{\Delta V_{Cb}} = \frac{C_S}{(C_S+C_D)}, C_\Sigma = C_s + C_D$$

Περίπτωση iii: Ασύμμετρες επαφές

Στην περίπτωση 2 είδαμε πως οι άνισες χωρητικότητες C_S και C_D έχουν σαν αποτέλεσμα την μη συμμετρική θέση των τάσεων φραγής Coulomb εκατέρωθεν του μηδέν. Είδαμε ακόμα ότι αυτή η ασυμμετρία παίζει μάλλον μικρό ρόλο μιας και δεν μπορεί να επηρεάσει την μορφή της καμπύλης I-V. Πράγματι, οι χαρακτηριστικές I-V στις περιπτώσεις 1 και 2 είναι ίδιες με μόνη διαφορά ότι στην δεύτερη περίπτωση οι τάσεις φραγής Coulomb δεν ισαπέχουν από το μηδέν. Ο σημαντικός παράγοντας στην περίπτωση που θα συζητήσουμε εδώ είναι οι άνισες τιμές των αντιστάσεων R_S και R_D. Ο παράγοντας αυτός αλλάζει εντελώς την μορφή της χαρακτηριστικής I-V που όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 παίρνει τη μορφή κλίμακας.



Σχήμα 5: Όταν οι επαφές S και D είναι ασύμμετρες η χαρακτηριστική I-V εμφανίζει σκαλιά. Στο πρώτο σκαλί το ρεύμα οφείλεται σε 1 ηλεκτρόνιο που περνάει από το ηλεκτρόδιο S στο D σε χρόνο ίσο με την χρονική σταθερά της διάταξης, στο δεύτερο σκαλί σε 2 κ.ο.κ.

Στην περίπτωση της χαρακτηριστικής του Σχήματος 5 έχουμε θεωρήσει ότι $R_S \neq R_D$ και $C_S = C_D$. Εάν είχαμε υποθέσει ότι $R_S \neq R_D$ και $C_S \neq C_D$, τότε η χαρακτηριστική θα εμφάνιζε πάλι σκαλιά αλλά η καμπύλη θα ήταν μετατοπισμένη ως προς την αρχή των αξόνων.

Κατά συνέπεια ο παράγοντας που παίζει τον κύριο ρόλο για την κλιμακωτή μορφή της καμπύλης I-V είναι η διαφορά των αντιστάσεων των επαφών S και D. Στη συνέχεια θα σχολιάσουμε την μορφή της χαρακτηριστικής I-V για θετικές τιμές της τάσης V_{DS}.

Παρατηρήσεις:

Όλα τα σκαλιά έχουν το ίδιο περίπου πλάτος V_{ST} και το ίδιο περίπου ύψος Δi.

Η τάση φραγής Coulomb είναι περίπου ίση με το μισό του πλάτους του σκαλιού.

Η τάση φραγής Coulomb δίνεται και πάλι από τη σχέση

$$V_{Cb}^{+} = \frac{q}{2C_{\Sigma}}$$

οπότε το πλάτος του σκαλιού θα είναι

$$V_{ST}^{+} = \frac{q}{C_{\Sigma}}$$

Ας υποθέσουμε ότι $R_D=10R_S$. Στην περίπτωση $V_{DS}>0$ το ηλεκτρόνιο περνάει σχετικά εύκολα από το ηλεκτρόδιο S στο νανοσωματίδιο και δύσκολα από το νανοσωματίδιο στο ηλεκτρόδιο D. Στην περίπτωση $V_{DS}<0$ είναι προφανές ότι συμβαίνει το αντίθετο. Έτσι είναι λογικό να πει κανείς ότι η αντίσταση της κίνησης από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο είναι περίπου ίση με την αντίσταση $R_{ToT}=R_S+R_D$ και πως ο χρόνος διέλευσης θα είναι ανεξάρτητος από την φορά της κίνησης του ηλεκτρονίου δηλ. θα είναι ο ίδιος για θετικές και αρνητικές τιμές της τάσης V_{DS}. Με βάση αυτό το συλλογισμό λέμε ότι ο χρόνος διέλευσης ενός ηλεκτρονίου από το S στο D μέσω του νανοσωματιδίου είναι:

$\tau = R_{ToT} \cdot (\mathrm{C_D}+\mathrm{C_S}),\ C_\Sigma = C_s + C_D$

Το ύψος του σκαλιού δίνεται από τη σχέση: $\Delta i = \frac{q}{\tau} = \frac{q}{R_{ToT}\cdot(\mathrm{C_D}+\mathrm{C_S})}$

Στο πρώτο σκαλί περνάει 1e σε χρόνο τ, στο δεύτερο σκαλί περνάνε 2e σε χρόνο τ κ.ο.κ.

Τι μπορούμε να υπολογίσουμε

Την χωρητικότητα $C_\Sigma= C_S + C_D$. Για θετικές τιμές της τάσης V_{DS} η τάση φραγής Coulomb δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Cb}^{+} = \frac{q}{2C_\Sigma}$$

Από την εξίσωση αυτή προσδιορίζεται η χωρητικότητα C_Σ. Η τάση φραγής Coulomb μπορεί να υπολογιστεί και από το πλάτος του σκαλιού με βάση τη σχέση

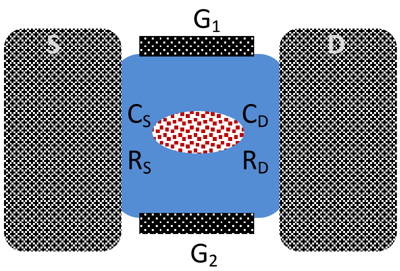
$$V_{ST}^{+} = \frac{q}{C_\Sigma}$$

Από το άλμα του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος διέλευσης και η ισοδύναμη αντίσταση σήραγγας.

3. Transistor ενός ηλεκτρονίου (SET) που περιέχει μεταλλικά νανοσωματίδια.

α. Περιγραφή της διάταξης

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την σχηματική μορφή του transistor ενός ηλεκτρονίου. Η διάταξη εμφανίζει πολλές ομοιότητες με το transistor τύπου MOSFET στο οποίο το κανάλι είναι τόσο μικρό ώστε η διέλευση να γίνεται βαλλιστικά. Στο transistor ενός ηλεκτρονίου τα ηλεκτρόνια περνάνε επίσης από την επαφή S στο νανοσωματίδιο και από εκεί στην επαφή D αλλά στην περίπτωση αυτή οι επαφές S και D έχουν πολύ περιορισμένη επικοινωνία με το νανοσωματίδιο λόγω του διηλεκτρικού που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο ηλεκτρόδια S και D και το νανοσωματίδιο. Η τάση πύλης εφαρμόζεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια G_1 και G_2. Παρατηρείστε ότι το πάχος του



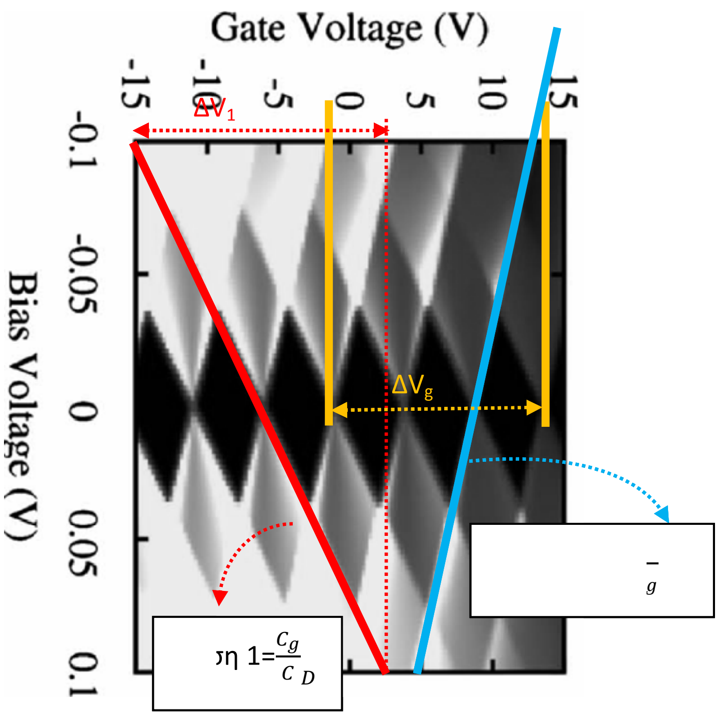
Σχήμα 6: Transistor ενός ηλεκτρονίου. Ανάμεσα στα ηλεκτρόδια G_1 και G_2 εφαρμόζεται η τάση πύλης μέσω της οποίας ελέγχεται ηλεκτροστατικά η αγωγιμότητα του νανοσωματιδίου.

διηλεκτρικού ανάμεσα στο νανοσωματίδιο και τα ηλεκτρόδια της πύλης είναι πολύ πιο παχύ από αυτό ανάμεσα στο νανοσωματίδιο και τα ηλεκτρόδια S και D. Ο λόγος είναι ότι για την καλή λειτουργία ενός transistor θέλουμε να μην υπάρχει ρεύμα διαρροής από την πύλη προς το νανοσωματίδιο. Μεταβάλλοντας κανείς την τάση πύλης μπορεί να μετατοπίζει τις ενεργειακές καταστάσεις του νανοσωματιδίου σε σχέση με τα ηλεκτροχημικά δυναμικά των ηλεκτροδίων S και D. Για τις χαρακτηριστικές i_{DS}-V_{DS} των transistor ενός ηλεκτρονίου ισχύει ότι συζητήσαμε μέχρι τώρα για τις χαρακτηριστικές I-V των απλών διατάξεων που περιέχουν νανοσωματίδια. Στη συνέχεια θα συζητήσουμε τους ρόμβους Coulomb και τις χαρακτηριστικές i_{DS}-V_g. Στην περίπτωση αυτή $C_{\Sigma} = C_D + C_S + C_g$

β. Διάγραμμα ρόμβων Coulomb.

Το διάγραμμα ρόμβων Coulomb απεικονίζει την μεταβολή της αγωγιμότητας $\frac{di_{DS}}{dV_{DS}}$ συναρτήσει δύο μεταβλητών: της τάσης πύλης (στον άξονα x) και της τάσης V_{DS} (στον άξονα ψ). Συνήθως οι σκοτεινές περιοχές αντιστοιχούν σε τιμές μηδενικής αγωγιμότητας (i_{DS}=0) και οι λευκές σε τιμές μέγιστης αγωγιμότητας. Από το διάγραμμα ρόμβων μπορεί κανείς να υπολογίσει τις χωρητικότητες C_g, C_D και C_S.

Το εύρος ενός ρόμβου μηδενικής αγωγιμότητας μετρημένο κατά μήκος του άξονα V_g ισούται με $\frac{q}{C_g}$. Στο σχήμα 7 φαίνεται ότι τρεις ρόμβοι αντιστοιχούν σε τάση ~15V. Επομένως $\frac{q}{C_g} = 5V$, από την εξίσωση αυτή υπολογίζεται η χωρητικότητα C_g.



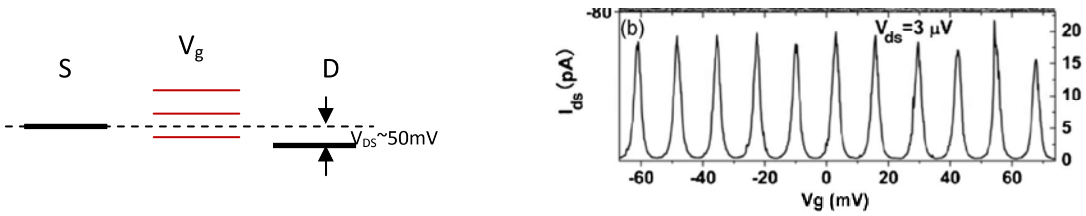
Σχήμα 7: Από τους ρόμβους Coulomb μπορούν να υπολογιστούν οι χωρητικότητες της διάταξης

Η κλίση της ευθείας 1 (αρνητική κλίση) είναι ίση με $\frac{C_g}{C_D}$, οπότε από την εξίσωση αυτή υπολογίζεται η χωρητικότητα C_D. Με βάση το σχήμα 7 προκύπτει ότι κλίση 1=$\frac{C_g}{C_D}$ = $\frac{\Delta Vbias}{\Delta V_1} = \frac{0{,}2}{18}$

Η κλίση της ευθείας 2 (θετική κλίση) είναι ίση με $\frac{C_g}{C_g+C_S}$, οπότε από την εξίσωση αυτή υπολογίζεται η χωρητικότητα C_g.

γ. Χαρακτηριστικές i_{DS}-V_g.

Η μέτρηση της χαρακτηριστικής i_{DS}-V_g γίνεται ως εξής: Εφαρμόζουμε μια μικρή τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια S και D, 50-100mV. Αυξάνουμε σιγά-σιγά την τάση V_g και μετράμε το ρεύμα i_{DS}.



Σχήμα 8: Διάγραμμα ζωνών κατά την μέτρηση της χαρακτηριστικής i_{DS}-V_g και χαρακτηριστική i_{DS}-V_g

Καθώς αυξάνεται η τάση V_g οι ενεργειακές καταστάσεις του νανοσωματιδίου κατεβαίνουν προς τα κάτω και μπαίνουν μέσα στο παράθυρο που ορίζουν τα ηλεκτροχημικά δυναμικά των επαφών D και S οπότε εμφανίζεται ρεύμα $i_{DS.}$ Όμως το ρεύμα αυτό μηδενίζεται γρήγορα γιατί η κατάσταση βγαίνει έξω από το παράθυρο. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αιχμές του ρεύματος ισούται με $\frac{q}{C_g}$.

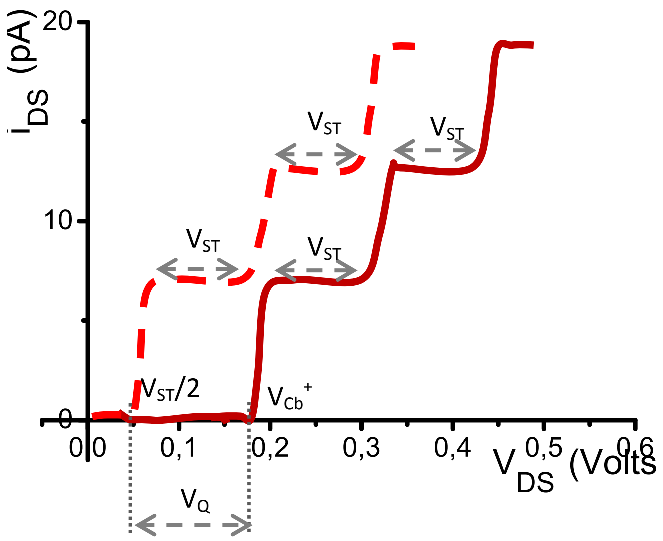
II. Transistor ενός ηλεκτρονίου (SET) που περιέχει κβαντικά σημεία (νανοσωματίδια ημιαγωγού).

Η συνεχής καμπύλη του σχήματος 9 παριστάνει την χαρακτηριστική i_{DS}-V_{DS} μιας διάταξης ενός ηλεκτρονίου η οποία περιέχει κβαντικά σημεία δηλαδή νανοσωματίδια αγωγού (για το πυρίτιο η διάμετρός τους πρέπει να είναι μικρότερη από 5nm). Στην περίπτωση αυτή η τάση φραγής Coulomb (V_{CB}) είναι μεγαλύτερη από $V_{ST}/2$ που είναι η τιμή της φραγής Coulomb για την περίπτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων. Η αιτία για αυτή τη διαφορά βρίσκεται στο φαινόμενο του κβαντικού περιορισμού, το οποίο θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Η διακεκομμάνη κόκκινη γραμμή παριστάνει την ίδια καμπύλη μετατοπισμένη προς τα αριστερά έτσι ώστε, η τάση φραγής Coulomb να απέχει από το μηδέν $V_{ST}/2$.

Τότε μπορεί κανείς να γράψει την σχέση $V_{Cb}=V_Q+ V_{ST}/2$, όπου η τάση V_Q είναι μια επιπλέον τάση που οφείλεται στον κβαντικό περιορισμό. Ας υποθέσουμε ότι η τάση V_Q προκαλείται από την φόρτιση ενός πυκνωτή με χωρητικότητα C_Q. Όπως είπαμε παραπάνω, η τάση $V_{ST}/2$ (που είναι ίση με την φραγή Coulomb όταν δεν υπάρχει κβαντικός περιορισμός) είναι ίση με q/2C$_\Sigma$ ενώ για την τάση V$_{Cb}$ θα είναι $V_{Cb}=\frac{q}{2C_{ToT}}$, όπου C$_{ToT}$ είναι η ισοδύναμη χωρητικότητα του C$_\Sigma$ και της C$_Q$. Οπότε θα είναι:

$$V_{Cb}=V_Q+\frac{V_{ST}}{2}=>\frac{q}{2C_{ToT}}=\frac{q}{2C_Q}+\frac{q}{2C_\Sigma}=>\frac{1}{C_{ToT}}=\frac{1}{C_Q}+\frac{1}{C_\Sigma}$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι στην προσέγγιση που χρησιμοποιούμε, η κβαντική χωρητικότητα είναι συνδεμένη στη σειρά με την ολική χωρητικότητα C$_\Sigma$.



Σχήμα 9: Χαρακτηριστική i$_{DS}$-V$_{DS}$ (συνεχής γραμμή) για διάταξη ενός ηλεκτρονίου που περιέχει κβαντικό σημείο (νανοσωματίδιο ημιαγωγού). Η φραγή Coulomb εμφανίζεται για τάση αρκετά μεγαλύτερη από την V$_{ST}$/2. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή δείχνει την ίδια χαρακτηριστική μετατοπισμένη έτσι ώστε η τάση Coulomb να απέχει από το μηδέν V$_{ST}$/2.

Με βάση το σχήμα 9 προκύπτει ότι:

$\frac{V_{ST}}{2}=0{,}04V$, $V_{Cb}=0{,}18V$ και $V_Q=0{,}14V$

Οπότε $C_\Sigma=\frac{q}{2\times 0{,}04}=2aF$

$C_Q=\frac{q}{2\times 0{,}14}=0{,}6aF$ και $C_{ToT}=\frac{q}{2\times 0{,}18}=0{,}4aF$