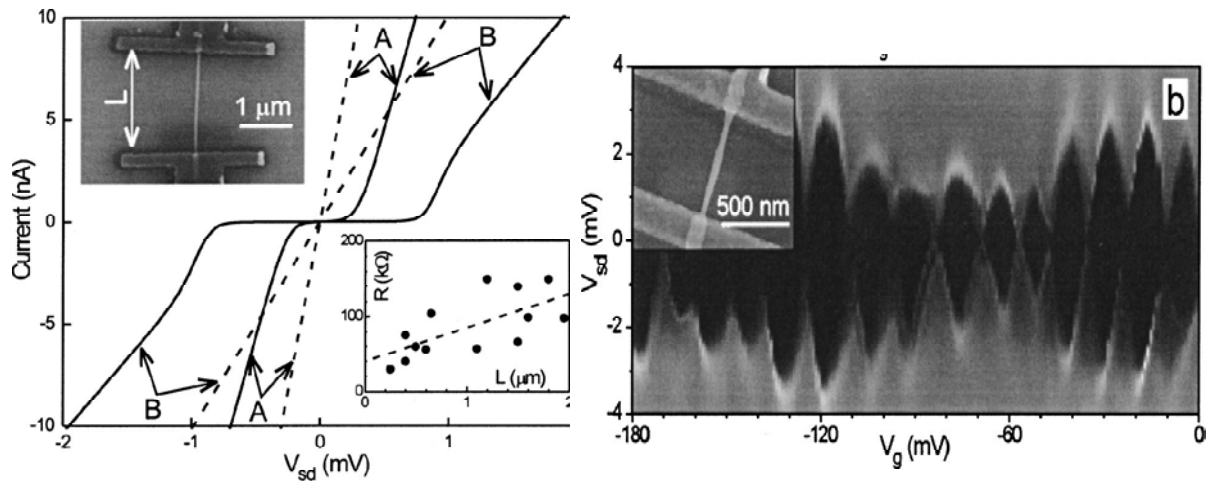


Πρόβλημα 1.

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές I-V για δυο διατάξεις στους 300K (διακεκομμένες γραμμές) και 350mK. Οι διατάξεις είναι transistors ενός ηλεκτρονίου (SET) με κανάλι ένα νανοκαλώδιο InP. Α) Να υπολογιστεί η ολική αντίσταση για τις δυο διατάξεις στους 300K. Το μέσα διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει του μήκους του καναλιού. Β) Εάν τα μήκη των καναλιών για τις διατάξεις Α και Β είναι αντίστοιχα $L_A=0,2\mu\text{m}$ και $L_B=1,97\mu\text{m}$ χρησιμοποιήστε το διάγραμμα αυτό για να βρείτε τις τιμές των αντιστάσεων. Συγκρίνετε με τις τιμές που βρήκατε στο ερώτημα Α. Γ) Να εξηγηθεί η μορφή των καμπυλών Β. Με βάση τις τιμές της τάσης Coulomb blockade για θετική και αρνητική τάση V_{sd} υπολογίστε τις ολικές χωρητικότητες $C_{\Sigma A}$ και $C_{\Sigma B}$ για τις δυο διατάξεις.

Δ) από το διάγραμμα Coulomb diamonds προσδιορίστε i) την τάση coulomb blockade, ii) την χωρητικότητα C_B iii) το πηλίκο C_B/C .



Λύση: Α) Η τιμή της ολικής αντίστασης R_S+R_D υπολογίζεται από την κλίση του γραμμικού μέρους της χαρακτηριστικής I-V. Παρατηρείστε ότι διακεκομμένη γραμμή έχει την ίδια περίπου κλίση με την αντίστοιχη συνεχή γραμμή.

$$\text{Για τις καμπύλες Α: } R_{\text{Total}} = \frac{\Delta V}{\Delta i} = \frac{0,25\text{mV}}{20\text{nA}} = 12,5\text{k}\Omega$$

$$\text{Για τις καμπύλες Β: } R_{\text{Total}} = \frac{\Delta V}{\Delta i} = \frac{2\text{mV}}{20\text{nA}} = 100\text{k}\Omega$$

Β) Με βάση το γράφημα της αντίστασης συναρτήσει του μήκους φαίνεται ότι για κανάλι $0,2\mu\text{m}$ η αντίσταση είναι περίπου $20\text{k}\Omega$ ενώ για κανάλι $1,97$ (τελευταίο σημείο προς τα δεξιά) η αντίστοιχη τιμή είναι λίγο λιγότερο από $100\text{k}\Omega$. Και οι δυο τιμές είναι σχετικά κοντά με αυτές που υπολογίστηκαν γραφικά.

Γ) Για να φαίνεται η φραγή Coulomb σε θερμοκρασία δωματίου πρέπει η τιμή της τάσης φραγής να είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την θερμική ενέργεια στους 300°Kelvin . Με βάση την καμπύλη Α $V_{cb}^A = 0,4\text{mV} = \frac{q}{C_{\Sigma A}} \Rightarrow C_{\Sigma A} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{0,4\text{mV}} = 400\text{aF}$

$$\text{Με βάση την καμπύλη Β } V_{cb}^B = 2\text{mV} = \frac{q}{C_{\Sigma B}} \Rightarrow C_{\Sigma B} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{2\text{mV}} = 80\text{aF}, \text{ όπου}$$

$$C_{\Sigma} = C_D + C_g + C_S$$

Δ) Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ότι χωράνε 4 ρόμβοι σε 50mV. Οπότε $12,5mV = \frac{q}{C_g} \Rightarrow$

$$C_g = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{12,5mV} = 12,8aF$$

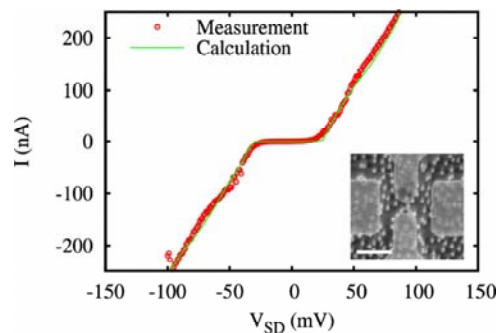
Η αρνητική κλίση είναι $= \frac{8mV}{40mV} = \frac{C_g}{C_D} \Rightarrow C_g = \frac{C_D}{5}$

Η θετική κλίση είναι $\frac{8mV}{30mV} = \frac{C_g}{C_g + C_S} \Rightarrow \frac{C_g}{C_g + C_S} = 0,27$

αλλά η χωρητικότητα $C_g = 12,8aF$ οπότε $C_D = 14aF$ και $C_S = 35,2aF$

Πρόβλημα 2.

Από το διάγραμμα I-V ενός transistor ενός ηλεκτρονίου υπολογίστε: την αντίσταση $R_{tunneling}$, την τάση V_{cb} για θετικές και αρνητικές τιμές της τάσης V_{SD} . Εξηγήστε γιατί αυτή η τάση κατανέμεται ασύμμετρα γύρω από την τάση $V_{SD}=0$ και υπολογίστε τον λόγο των χωρητικότητων C_S και C_D . Με βάση την μορφή της καμπύλης I-V οι επαφές S και D είναι συμμετρικές ή όχι;



Λύση:

Από τη γραφική παράσταση φαίνεται ότι $V_{cb}^+ = 20mV$ και $V_{cb}^- = -30mV$.

Η συνολική φραγή Coulomb είναι 50mV οπότε $50mV = \frac{q}{C_{\Sigma}} \Rightarrow C_{\Sigma} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{50mV} = 3,2aF$

$$\frac{V_{cb}^+}{\Delta V_{Cb}} = \frac{C_S}{C_S + C_D} = \frac{20mV}{50mV} \Rightarrow C_S = \frac{2}{5} C_{\Sigma} = 1,28aF$$

και

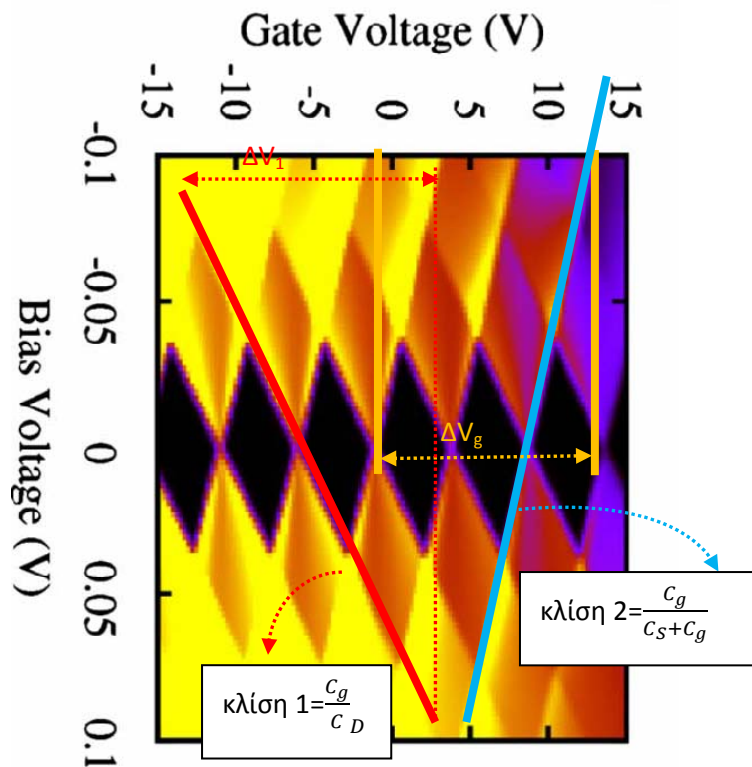
$$\frac{V_{cb}^-}{\Delta V_{Cb}} = \frac{C_D}{C_S + C_D} = \frac{30mV}{50mV} \Rightarrow C_D = \frac{3}{5} C_{\Sigma} = 2,1aF$$

Οι δύο επαφές παρουσιάζουν ασυμμετρία ως προς την χωρητικότητα, όμως οι αντιστάσεις έχουν παραπλήσιες τιμές γι' αυτό οι χαρακτηριστικές I-V είναι λείες και δεν περιέχουν σκαλιά. Το νανοσωματίδιο πρέπει να είναι μεταλλικό. Συνήθως τα ημιαγώγιμα

νανοσωματίδια παρουσιάζουν πιο απρόβλεπτη συμπεριφορά λόγω του κβαντικού περιορισμού.

Πρόβλημα 3

Με βάση το διάγραμμα Coulomb diamonds υπολογίστε: α) την τάση Coulomb blockade για θετικές και αρνητικές τάσεις (bias voltage) β) την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη έτσι ώστε να μην εμφανίζεται η φραγή Coulomb γ) Η χωρητικότητα C_g δ) από τις κλίσεις των Coulomb diamonds υπολογίστε τις χωρητικότητες των επαφών S & D.



Λύση:

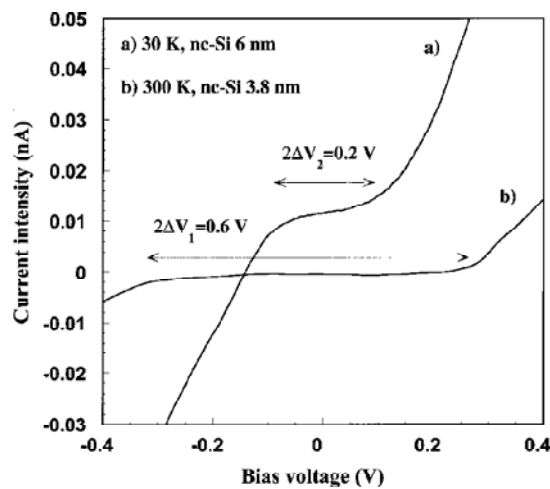
Το εύρος ενός ρόμβου μηδενικής αγωγιμότητας μετρημένο κατά μήκος του άξονα V_g ισούται με $\frac{q}{C_g}$. Στο σχήμα φαίνεται ότι τρεις ρόμβοι αντιστοιχούν σε τάση $\sim 15V$. Επομένως $\frac{q}{C_g} = 5V$, από την εξίσωση αυτή υπολογίζεται η χωρητικότητα C_g .

Η κλίση της ευθείας 1 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 = $\frac{C_g}{C_D} = \frac{\Delta V_{bias}}{\Delta V_1} = \frac{0,2}{18}$

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

Πρόβλημα 4

Από τις χαρακτηριστικές I-V υπολογίστε την αντίσταση σήραγγας, την τάση φραγής Coulomb, είναι η τάση αυτή συμμετρική ως προς το μηδέν; Τι πληροφορία συνάγεται από αυτό; Με βάση την μορφή της χαρακτηριστικής I-V πως θα χαρακτηρίζατε τις επαφές S & D; Υπολογίστε τις τιμές των χωρητικότητων $C_{\Sigma 1}$ & $C_{\Sigma 2}$. Μια προσεγγιστική έκφραση για τη χωρητικότητα του νανοσωματιδίου είναι η $C = 4\pi\epsilon_{ox}\epsilon_0 r^2/t$, όπου ϵ_{ox} η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου του πυριτίου, r η ακτίνα του νανοσωματιδίου και t το πάχος του οξειδίου που περιβάλλει το νανοσωματίδιο. Αν $t=1,2\text{nm}$ και $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ F/m να υπολογιστεί η χωρητικότητα.



Λύση:

Το πλάτος της φραγής Coulomb για το νανοσωματίδιο Si 6nm είναι 0,2Volt. Οπότε:

$$200mV = \frac{q}{C_{\Sigma 2}} \Rightarrow C_{\Sigma 2} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{200mV} = 0,8aF$$

Το πλάτος της φραγής Coulomb για το νανοσωματίδιο Si 3,8nm είναι 0,6Volt. Οπότε:

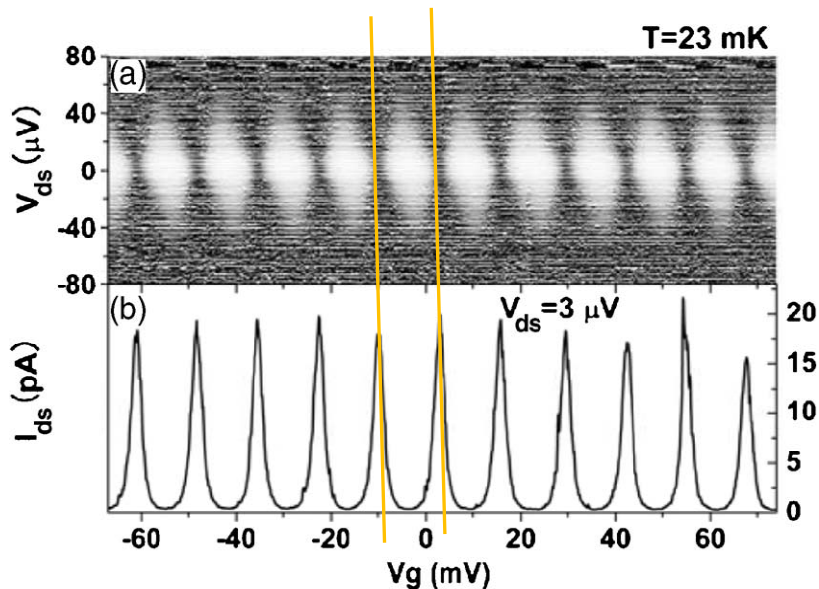
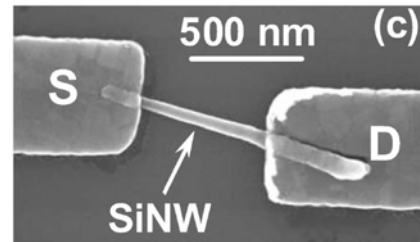
$$600mV = \frac{q}{C_{\Sigma 1}} \Rightarrow C_{\Sigma 1} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{600mV} = 0,3aF$$

Η χωρητικότητα του συστήματος δίνεται από τη σχέση $C = 4\pi\epsilon_{ox}\epsilon_0 r^2/t$, αντικαθιστώντας προκύπτει $C=3,25aF$

Η χωρητικότητα του νανοσωματιδίου θεωρούμε ότι συνδέεται στη σειρά με την ολική χωρητικότητα.

Πρόβλημα 6

Στο transistor ενός ηλεκτρονίου του διπλανού σχήματος έγιναν ηλεκτρικές μετρήσεις και προέκυψαν τα διαγράμματα που δίνονται στην συνέχεια. Στο διάγραμμα Coulomb diamonds οι λευκές περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές μηδενικού ρεύματος. Με βάση το διάγραμμα Coulomb diamonds υπολογίστε: α) την τάση Coulomb blockade για θετικές και αρνητικές τάσεις (bias voltage) β) την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη έτσι ώστε να μην εμφανίζεται η φραγή Coulomb γ) Η χωρητικότητα C_g δ) από τις κλίσεις των Coulomb diamonds υπολογίστε τις χωρητικότητες των επαφών S & D.



Λύση: Η τάση Coulomb δίνεται κατά προσέγγιση από την προβολή των δύο κορυφών του ρόμβου επάνω στον άξονα της τάσης V_{ds} . Δηλαδή είναι $V_{cb}^+ = V_{cb}^- = 40 \mu V$.

Η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη ώστε να άγει το transistor δεν είναι άλλη από την απόσταση της τιμής 0 επάνω στον άξονα V_g μέχρι το πρώτο μέγιστο (στο κάτω διάγραμμα) ή μέχρι την άκρη του ρόμβου. Οπότε η ζητούμενη τιμή είναι περίπου 4mV για θετικές τάσεις ή -9mV για αρνητικές.

Το εύρος του ρόμβου μετρημένο κατά μήκος του άξονα V_g είναι περίπου 13mV οπότε:

$$13mV = \frac{q}{C_g} \Rightarrow C_g = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{13mV} = 12,3aF$$

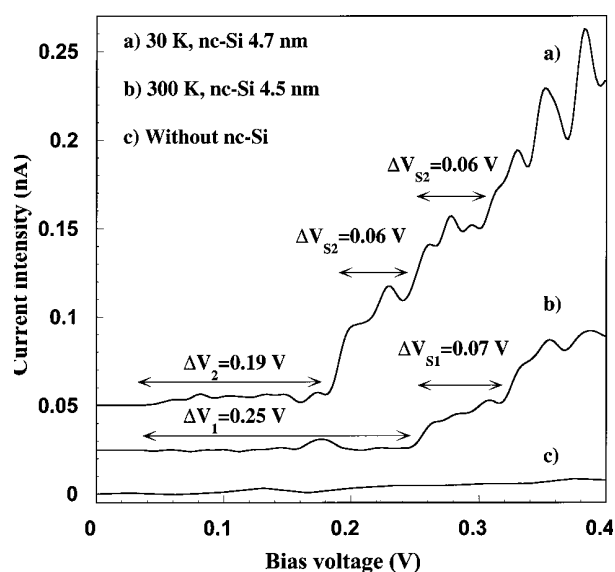
$$\text{Η αρνητική κλίση είναι } = \frac{0,16mV}{30mV} = \frac{C_g}{C_D} \Rightarrow C_g = 0,005C_D$$

$$\text{Η θετική κλίση είναι } \frac{0,16mV}{20mV} = \frac{C_g}{C_g + C_S} \Rightarrow \frac{C_g}{C_g + C_S} = 0,008$$

αλλά η χωρητικότητα $C_G = 12,3aF$ οπότε $C_D = 2,46fF$ και $C_S = F$

Πρόβλημα 7

Οι χαρακτηριστικές I-V περιγράφουν την μεταβολή του ρεύματος σε μια δομή της μορφής Source-νανοσωματιδίο Si-Drain στην οποία παρατηρείται φραγή Coulomb (-κός πόλος στο S και +κος στο D). Α) Από την τάση φραγής Coulomb υπολογίστε την χωρητικότητα C_{Tot} . β) Από το πλάτος του σκαλιού υπολογίστε την χωρητικότητα C_S . γ) Σύμφωνα με τις προβλέψεις της θεωρίας το πλάτος του σκαλιού πρέπει να είναι διπλάσιο από την τάση φραγής Coulomb. Εξηγήστε γιατί δεν συμβαίνει αυτό. Υπολογίστε την τιμή της κβαντικής χωρητικότητας. Δ) Σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα για αυτή την περίπτωση.



Η ολική χωρητικότητα υπολογίζεται από το πλάτος της φραγής Coulomb.

$$190mV = \frac{q}{C_{Tot}} \Rightarrow C_{Tot} = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{190mV} = 0,84aF$$

Αν δεν υπήρχε κβαντικός περιορισμός θα ήταν $V_{cb}^+ = V_{ST}/2 = 0,06/2 = 0,03$ Volts.

$$30mV = \frac{q}{C_S} \Rightarrow C_S = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{30mV} = 5,3aF$$

Η παραπάνω τάση από την τιμή των 0,03Volts οφείλεται στον κβαντικό περιορισμό δηλ.

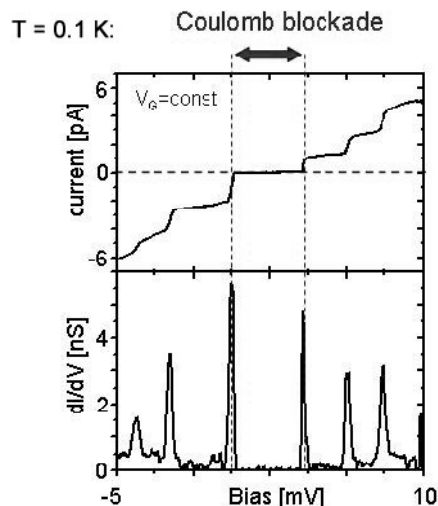
$0,19 - 0,03 = 0,16$ Volts οφείλονται στον κβαντικό περιορισμό.

$$\Delta V_Q = q/2C_Q \text{ ή } C_Q = q/2\Delta V_Q = 1,6 \times 10^{-19} / 2 \times 0,16 = 5 \times 10^{-19} = 0,5aF$$

Οι χωρητικότητες C_Q και C_S είναι συνδεδεμένες στη σειρά.

Πρόβλημα 8

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος I_{DS} συναρτήσει της τάσης SD σε ένα transistor ενός ηλεκτρονίου. Α) Υπολογίστε την χωρητικότητα C_S υποθέτοντας ότι η χαμηλή τάση είναι συνδεδεμένη στο ηλεκτρόδιο S. Β) Είναι οι επαφές συμμετρικές; Παρατηρούνται φαινόμενα κβαντικού περιορισμού; Γ) Μέχρι ποια θερμοκρασία θα είναι διακριτό το φράγμα Coulomb; Δ) Σχεδιάστε το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών.



Η διάταξη είναι συμμετρική ως προς τη χωρητικότητα αλλά δεν είναι συμμετρική ως προς την αντίσταση των δυο επαφών. Κατά προσέγγιση η συνολική αντίσταση των δυο επαφών είναι $10\text{mV}/5\text{pA}=2\text{G}\Omega$.

Το συνολικό εύρος της φραγής Coulomb είναι 5mV οπότε:

$$5\text{mV} = \frac{q}{C_S} \Rightarrow C_S = \frac{1,6 \times 10^{-19}}{5\text{mV}} = 32\text{aF}$$

Παρατηρούμε ότι το εύρος της φραγής Coulomb είναι περίπου ίσο με το εύρος του σκαλιού πράγμα που σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται φαινόμενα κβαντικού περιορισμού.

Η φραγή Coulomb είναι παρατηρήσιμη μέχρι μια θερμοκρασία όπου:

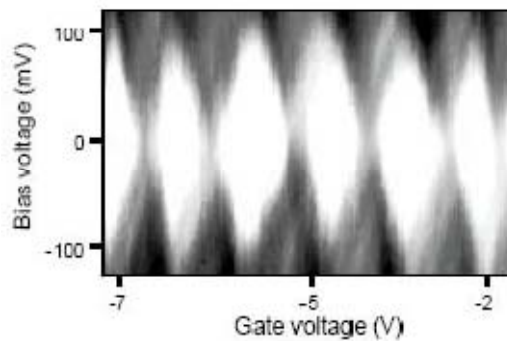
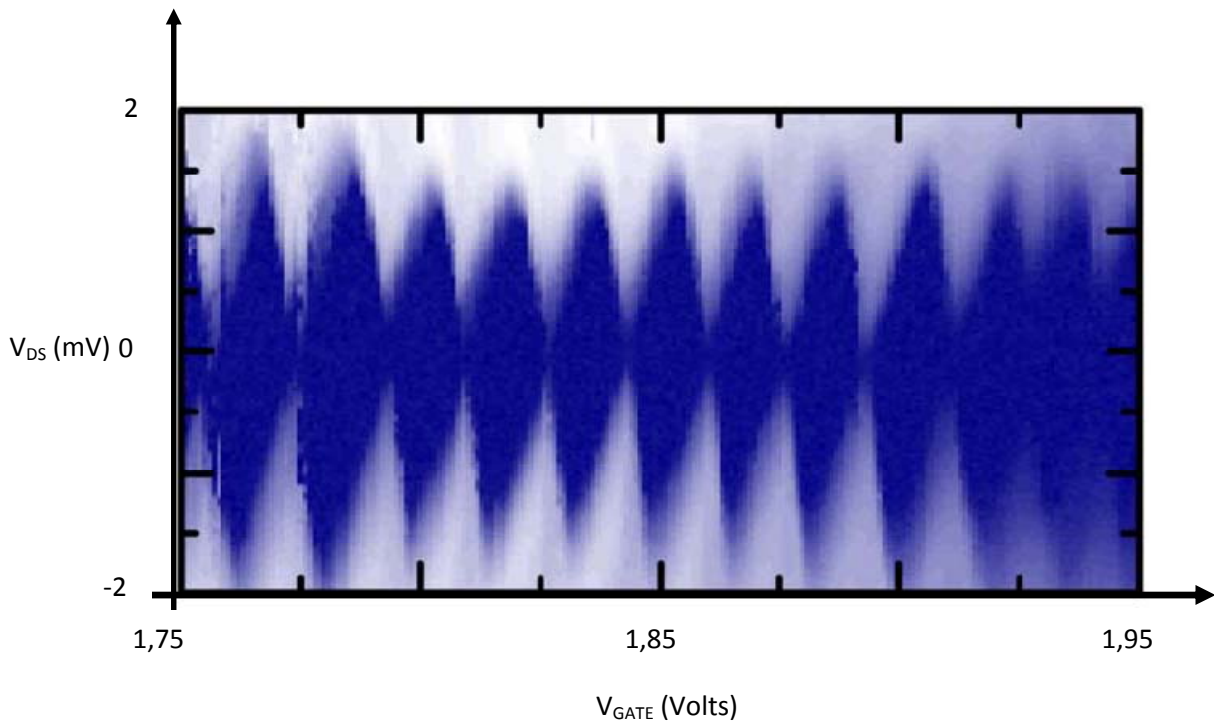
$$\Delta V_{CB} = 3kT \text{ ή } T = \Delta V_{CB}/3k.$$

ξέρουμε ότι kT στους 300K είναι ίσο με 26mV οπότε $k=26\text{mV}/300\text{K}$

Αντικαθιστώντας προκύπτει $T=20\text{kelvin}$.

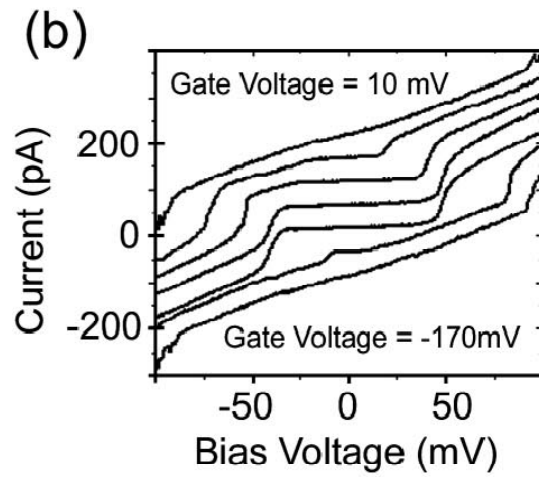
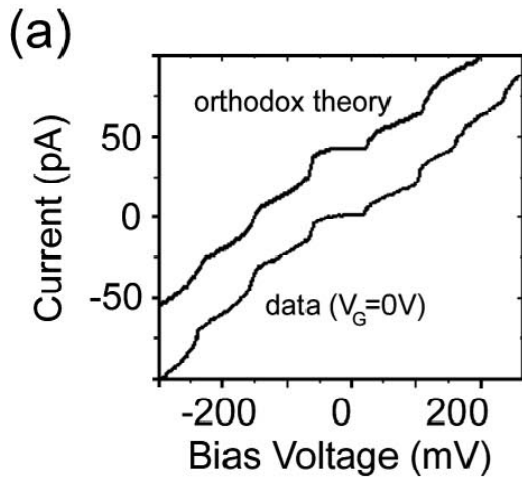
Πρόβλημα 9

Από τα επόμενα διαγράμματα υπολογίστε τις χωρητικότητες C_G , C_S και C_D .

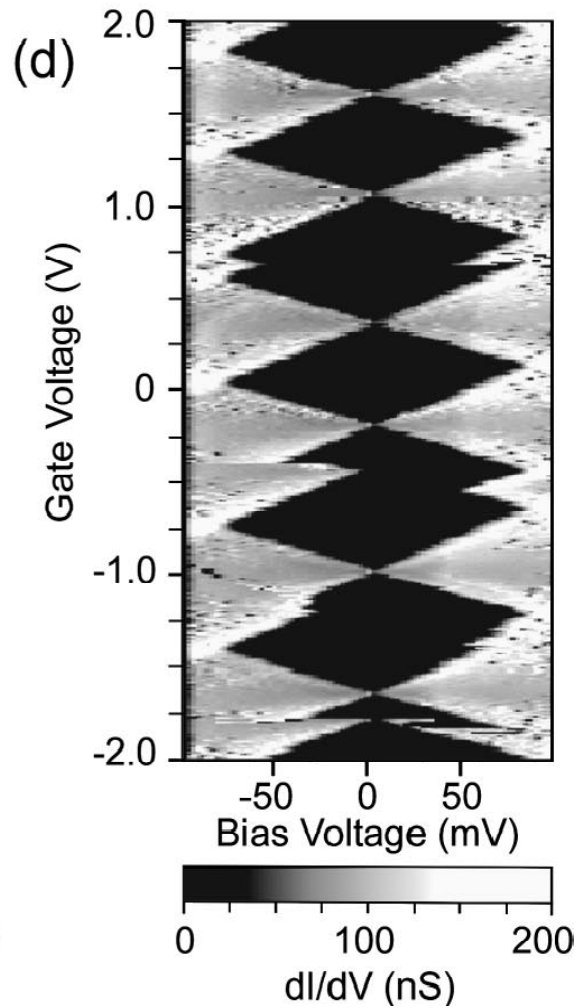
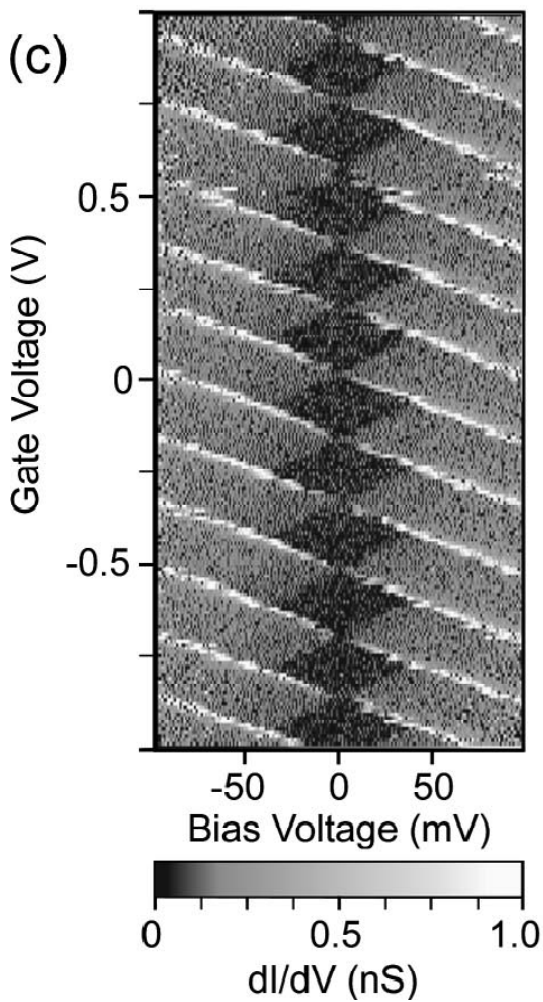


Πρόβλημα 10

Ένα transistor ενός ηλεκτρονίου παρουσιάζει την χαρακτηριστική i_{ds} - V που φαίνεται στο αριστερό διάγραμμα. Είναι οι επαφές συμμετρικές; Υπολογίστε τις χωρητικότητες C_S και C_D . Το διάγραμμα στα δεξιά παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές i_{ds} - V για ισαπέχουσες τάσεις πύλης (-170mV η χαμηλότερη με βήμα 30mV έως 10mV). Με βάση τις πληροφορίες σχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα ζωνών.



Από τα διαγράμματα Coulomb diamonds υπολογίστε τις χωρητικότητες C_G , C_S και C_D . Λί



Λύση: