



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΠΑΡΕΜΕΤΡΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ MOSFET 'BSIM4 σε EKV3'**

Εκπόνηση

ΤΣΙΡΟΝΙΚΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ

Εξεταστική επιτροπή

ΜΠΟΥΧΕΡ ΜΑΤΤΙΑΣ (επιβλέπων)

ΚΑΛΑΙΤΖΑΚΗΣ ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΜΠΑΛΑΣ ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2010

Αυτή η διπλωματική εργασία δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια, καθώς και την πρακτική όσο και συναισθηματική υποστήριξη, κάποιων ανθρώπων.

Πρώτα απο όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Ματτία Μπούχερ, που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με τον άγνωστο, για εμένα, κόσμο μοντελοποίησης του MOSFET.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Άννα Χαλκιαδάκη, γιατί χωρίς την άμεση βοήθειά της, την συνεχόμενη ενθάρρυνσή της και την μεγάλη αισιοδοξία της, η διπλωματική αυτή εργασία, δε θα είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Θοδωρή Κοσμόπουλο, για την πολύτιμη βοήθειά του σε θέματα πληροφορικής, που προέκυπταν καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε..

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MOSFET	7
1.1.1 EKV	7
1.1.1.1 Φαινόμενα που καλύπτονται από το EKV μοντέλο:	8
1.1.2 BSIM4	9
1.1.3 HiSIM	10
1.1.3.1 Φαινόμενα που καλύπτονται από το HiSIM μοντέλο	11
1.1.4 PSP	12
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	14
1.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	15
1.3.1 Agilent ICCAP2006B	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
2. ΜΟΝΤΕΛΟ EKV3	18
2.1 Μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση φορτίου	18
2.2 Γενικές πληροφορίες	20
2.2.1 Ορισμός βασικών μεγεθών του EKV3 και γενικές εξισώσεις	21
2.2.2 Ρεύμα καναλιού	24
2.2.3 Διαγωγιμότητα και φορτία	27
2.3 Φαινόμενα και παράμετροι συσχέτισης	28
2.3.1 Φαινόμενα ανώτερης τάξης σε διατάξεις μεγάλων διαστάσεων	28
2.3.2 Φαινόμενα κοντού καναλιού (short channel effects)	30
2.3.3 Φαινόμενα στενού καναλιού (narrow channel effects)	33
2.3.3.1 Φαινόμενα που σχετίζονται με την θερμοκρασία (Effects related to temperature)	34
2.3.4 Λοιπά φαινόμενα καναλιού	34

2.3.5	Θόρυβος (noise)	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		37
3.	ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	37
3.1	Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων	37
3.2	Ανάλυση της διαδικασίας εξαγωγής παραμέτρων	40
3.2.1	Long and Wide Channel Device	40
3.2.2	Short and Wide Channel Device	46
3.2.3	Length Scaling (Wide Channel Device)	53
3.2.4	Long and narrow Channel Device	56
3.2.5	Width Scaling (Long Channel Device)	57
3.2.6	Short and narrow Channel Device	58
3.3	PMOS	59
3.3.1	Long and Wide Channel Device	59
3.3.2	Short and Wide Channel Device	65
3.3.3	Length Scaling (Wide Channel Device)	69
3.3.4	Long and narrow Channel Device	72
3.3.5	Width Scaling (Long Channel Device)	74
3.3.6	Short and narrow Channel Device	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		78
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78

Περίληψη

Οι σχεδιαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων λαμβάνουν από τις εταιρείες κατασκευαστών μια βιβλιοθήκη με μοντέλα προσομοίωσης κυκλωμάτων, που περιέχουν όμως κάποιους περιορισμούς. Για τον σχεδιασμό αναλογικών και RF κυκλωμάτων έχει αναπτυχθεί από την ομάδα του εργαστηρίου Ηλεκτρονικής το συμπαγές μοντέλο για τρανζίστορ MOSFET EKV3. Για να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο από τους σχεδιαστές, θα πρέπει να προσαρμοστούν οι παράμετροι του μοντέλου, έτσι ώστε να αντικατασταθούν τα υπάρχοντα μοντέλα. Όμως, η διαδικασία προσαρμογής του μοντέλου EKV3 είναι πολύ χρονοβόρα.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία αυτοματοποιημένου συστήματος μετατροπής παραμέτρων μοντέλου MOSFET 'BSIM4 σε EKV3'. Είναι μια διαδικασία πολυσύνθετη και χρονοβόρα. Η υλοποίηση του συστήματος βασίζεται στη λεπτομερή μεθοδολογία εξαγωγής παραμέτρων που έχει αναπτυχθεί. Πρέπει όμως να αντιμετωπιστούν και οι δυσκολίες που πηγάζουν στις γνωστές ανεπάρκειες του μοντέλου BSIM4 για αναλογικά και RF κυκλώματα. Μία από αυτές τις ανεπάρκειες είναι το λεγόμενο 'binning', με χρήση πολλαπλών συνόλων παραμέτρων για την κάλυψη μεγάλου εύρους γεωμετριών. Έτσι το σύστημα μετατροπής παραμέτρων αρχικά μεταφράζει ένα σύνολο παραμέτρων από BSIM4 σε EKV3 μοντέλο, για να γίνεται κατάλληλη αρχικοποίηση των υπολοίπων παραμέτρων. Η υπόλοιπη διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων στηρίζεται κυρίως σε χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την εύρεση κατάλληλων συνόλων παραμέτρων EKV3. Αυτή η διαδικασία έχει υλοποιηθεί για μια τεχνολογία CMOS της γενιάς 90 nm. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται ένα μοναδικό σύνολο παραμέτρων του EKV3 μοντέλου να καλύψει εν γένει όλες τις γεωμετρίες, με σημαντικό όφελος για τους σχεδιαστές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MOSFET

Παρακάτω δίνουμε κάποιες γενικές πληροφορίες για κάποια μαθηματικά μοντέλα που είναι σχεδιασμένα για την προσομοίωση κυκλωμάτων και τη σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων. Κάποια βέβαια με αρκετά μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με κάποια άλλα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών είναι το EKV, το BSIM, το PSP και το HiSIM.

1.1.1 EKV

Το **μοντέλο EKV** MOSFET είναι ένα μαθηματικό μοντέλο τρανζίστορ πεδιακού φαινομένου, το οποίο είναι σχεδιασμένο για την προσομοίωση κυκλωμάτων και την σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων. Αναπτύχθηκε από τους C. C. Enz, F. Krummenacher, και E. A. Vittoz (εξ ου και τα αρχικά **EKV**) περί του 1995 [1], βασισμένο εν μέρει σε εργασία που είχαν κάνει την δεκαετία του 1980. Σε αντίθεση με απλούστερα μοντέλα, το μοντέλο EKV είναι ακριβές ακόμα και όταν το MOSFET λειτουργεί στην περιοχή κάτω από την τάση κατωφλίου (subthreshold region) (π.χ. όταν $V_{\text{bulk}}=V_{\text{source}}$ τότε το MOSFET είναι στην περιοχή κάτω από την τάση κατωφλίου όταν $V_{\text{gate-source}} < V_{\text{Threshold}}$), η οποία αναφέρεται και ως περιοχή weak inversion (ασθενή αναστροφή). Η ανάπτυξη του πλήρους μοντέλου φορτίων, σε διαφορετική φυσική βάση, υπό την ονομασία “EKV v2.6”, το 1996 [2], αποτελούσε αποτέλεσμα της διδακτορικής έρευνας του κ. M. Bucher, στο Πολυτεχνείο Λοζάνης (EPFL) [3]. Έκτοτε, συνεχίζει η ανάπτυξη του μοντέλου EKV για τεχνολογίες επόμενης γενιάς CMOS, από την ομάδα του κ. Matthias Bucher, πρώτα στο ΕΜΠ και ύστερα, από το 2004, στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Αποτέλεσμα είναι το πλήρες compact μοντέλο βασισμένο σε φορτία αναστροφής, με πλήρη κάλυψη φαινομένων ultra-deep submicron τεχνολογιών, υπό τη μορφή του μοντέλου γνωστό ως EKV3 μοντέλο [4], ως μέρος διδακτορικής διατριβής του Α. Μπαζίγου [5]. Όπως και για τις ανωτέρω γενιές του μοντέλου EKV, το EKV3 μοντέλο απευθύνεται στη σχεδίαση ολοκληρωμένων αναλογικών κυκλωμάτων με υπομικρομετρικές (submicron) τεχνολογίες CMOS, αλλά επιπλέον και σε εφαρμογές κυκλωμάτων RF. Το EKV είναι ένα μοντέλο MOSFET χαμηλής

ισχύος και είναι προηγμένο σε κυκλώματα χαμηλής τάσης και χαμηλού ρεύματος καθώς και υψηλής συχνότητας.

Δεδομένου ότι η τάση των κυκλωμάτων μειώνεται για να μειώσει την κατανάλωση ισχύος σε ψηφιακά κυκλώματα, τα αναλογικά κυκλώματα απαιτούν ένα φυσικότερο, πιο ακριβές και πιο συμπαγές μοντέλο MOS.

Το μοντέλο EKV3 αποτελεί μια ολοκαίνουργια προσέγγιση στην αναλυτική διαμόρφωση MOSFET. Επίσης είναι ένα καλό μοντέλο για προσομοιώσεις χαμηλής ισχύος αναλογικών κυκλωμάτων.

Οι απαιτήσεις για ένα καλό μοντέλο MOSFET παρουσιάζονται παρακάτω[6]:

- Παρέχεται ακρίβεια για χαρακτηριστική IV
- Δίνει ακριβείς τιμές για της διαγωγιμότητες g_m , g_{ms} , g_{ds} και όλες τις χωρητικότητες. Οι τιμές είναι συνεχείς όσον αφορά οποιαδήποτε τελική τάση.
- Δίνει καλά αποτελέσματα ακόμα και όταν λειτουργεί με NQS (non-quasistatic) τρόπο
- Δίνει την ακριβή πρόβλεψη του άσπρου θορύβου σε οποιοδήποτε τρόπο λειτουργίας
- Καλό μοντέλο για φαινόμενα θερμοκρασίας
- Καλό μοντέλο με οποιοδήποτε συνδυασμό πλάτους και μήκους καναλιών για μια δεδομένη τεχνολογία
- Έχει όσο το δυνατόν λιγότερες παραμέτρους
- Επιτρέπει μια αποδοτική και όσο το δυνατόν απλούστερη μεθοδολογία εξαγωγής παραμέτρων
- Είναι υπολογιστικά αποδοτικό μοντέλο

1.1.1.1 Φαινόμενα που καλύπτονται από το EKV μοντέλο:

- Βασικές γεωμετρικές και σχετικές με τη διαδικασία μεταβλητές
- Μείωση κινητικότητας λόγω του κάθετου τομέα

- Κορεσμός ταχύτητας μεταφορέων
- RSCE φαινόμενο
- Στατιστικό ταίριασμα μεταξύ ομοίων στοιχείων
- Βελτιωμένη πρόβλεψη θερμικού και flicker θορύβου
- Ακρίβεια στην αδύναμη αναστροφή (weak inversion)

1.1.2 BSIM4

Το BSIM4 αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τα ακόλουθα ζητήματα, για τα οποία προηγούμενα μοντέλα όπως π.χ. BSIM3v3 βρέθηκαν ανακριβή, όπως την ακρίβεια στα RF (προσομοιώσεις αναλογικών κυκλωμάτων CMOS για υψηλές συχνότητες και υψηλές ταχύτητες) και πρότυπη λειτουργία (μοντέλο εξαρτώμενο από τη γεωμετρία).

Το BSIM4 είναι ένα μοντέλο δημόσιου τομέα, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί πολύ ευρέως στη βιομηχανία, και έως πρότινος αποτελούσε το standard μοντέλο για την βιομηχανία[7].

Το BSIM4 αποδίδει για πλήθος φυσικών φαινομένων:

- Τάση κατωφλίου short-narrow καναλιού
- Μείωση κινητικότητας λόγω του κορεσμού ταχύτητας
- Διάσταση φορτίου
- Ταχύτητα κορεσμού
- Πτώση φράγματος λόγω της τάσης στο drain
- Διαμόρφωση μήκους καναλιού
- Substrate current induced body effect
- Κβαντικό μηχανικό μοντέλο πάχους φορτίου
- Ενοποιημένο μοντέλο flicker θορύβου

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθούν και μια σειρά μειονεκτήματα του μοντέλου BSIM4, όπως η μεγάλη περιπλοκότητα και ο τεράστιος αριθμός παραμέτρων (>1000), ενώ στερείται καλής φυσικής βάσης. Ως αποτέλεσμα, γίνεται δύσκολος ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας του μοντέλου σε μεγάλο εύρος γεωμετριών, χρειάζεται το λεγόμενο binning με υποδιαίρεση γεωμετρίας, δεν καλύπτει πλήρως φαινόμενα υψηλής συχνότητας (π.χ. induced gate noise), και δεν είναι σύμμετρικό ως προς τις τάσεις source-drain κ.ο.κ.

1.1.3 HiSIM

Το HiSIM αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Χιροσίμα, σε συνεργασία με το ερευνητικό κέντρο STARC της Ιαπωνίας. Αυτό το μοντέλο υιοθετεί την προσέγγιση drift-diffusion, διαμορφώνοντας έτσι σωστά το δυναμικό επιφάνειας στο κανάλι[8]. Είναι εκπρόσωπος των μοντέλων τύπου surface potential (δυναμικού επιφάνειας).

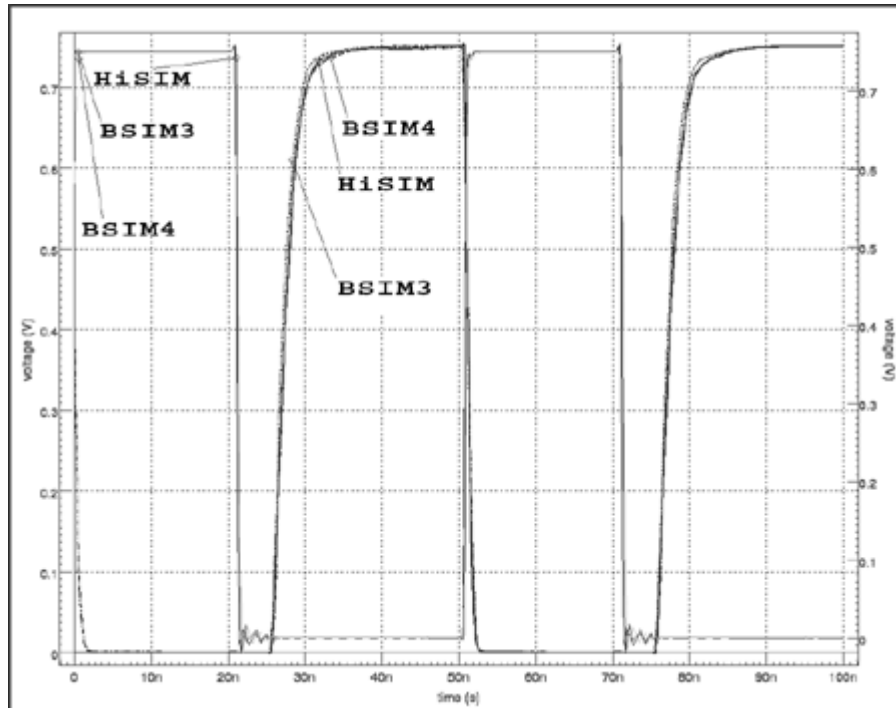
Τα συμβατικά μοντέλα MOSFET χρησιμοποιούν συχνά τις μη φυσικές παραμέτρους σε χαρακτηριστικά μεταξύ των διαφορετικών τρόπων λειτουργίας. Δεδομένου ότι το HiSIM χρειάζεται μόνο ένα σύνολο εξισώσεων, έγκυρο για όλους τους τρόπους λειτουργίας, μόνο οι φυσικές παράμετροι είναι απαραίτητες. Επομένως, το HiSIM δεν είναι μόνο ακριβές, αλλά μειώνει και τον αριθμό παραμέτρων που απαιτούνται για να διαμορφώσουν μια συσκευή MOSFET.

Η προσέγγιση HiSIM οδηγεί σε:

- Καμία αλληλεξάρτηση σημαντικών παραμέτρων
- Εύκολη εξαγωγή παραμέτρων
- Μόνο 19 παράμετροι χρειάζονται για να διαμορφώσουν ένα IV χαρακτηριστικό
- Τα παράγωγα είναι συνεχή πέρα από ολόκληρη τη λειτουργούσα σειρά
- Ένα σετ παραμέτρων για όλα τα μήκη και τα πλάτη καναλιών

1.1.3.1 Φαινόμενα που καλύπτονται από το HISIM μοντέλο

- Φαινόμενα κοντού καναλιού
- Ανάστροφο φαινόμενο κοντού καναλιού
- Μετακίνηση τάσης κατωφλίου λόγω της τάσης στον ακροδέκτη drain σε διατάξεις ανομοιογενούς κατά μήκος συγκέντρωσης του σώματος (pocket implants)
- Φαινόμενα στενού καναλιού
- Ταχύτητα κορεσμού
- Poly-depletion
- Θερμοκρασία
- Φαινόμενο πίεσης δομής απομόνωσης ρηχής τάφρου (Shallow trench isolation)
- Κβαντικά φαινόμενα
- Θερμικός θόρυβος
- Induced gate noise
- GILD
- Χωρητικότητα θυσάνωσης και επικάλυψης



Σχήμα1.2: Η προσομοίωση του HiSIM δείχνει μεγάλη ακρίβεια

1.1.4 PSP

Το PSP είναι ένα συμπαγές μοντέλο MOSFET που έχει αναπτυχθεί από κοινού από την έρευνα της Philips (σήμερα NXP) και του κρατικού Pennsylvania State πανεπιστημίου, και σήμερα, Arizona State University[9].

Το PSP είναι ένα μοντέλο MOS βασισμένο στο δυναμικό επιφάνειας, που περιέχει όλα τα σχετικά φυσικά φαινόμενα όπως μείωση κινητικότητας, κορεσμός ταχύτητας, DIBL, ρεύμα πυλών, πίεση STI, κ.λπ.

Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου PSP είναι:

- Κατάλληλο για ψηφιακά, αναλογικά, και RF κυκλώματα
- Είναι βασισμένο στη φυσική
- Συνδυάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του μοντέλου SP (κρατικό Penn πανεπιστήμιο) και του μοντέλου 11 MOS (Philips)(με συνδυασμό αυτών των δύο μοντέλων δημιουργήθηκε)
- Ο αριθμός παραμέτρων και οι χρόνοι προσομοίωσης είναι συγκρίσιμοι με αυτούς του προτύπου 11 MOS

- Απλή εξαγωγή παραμέτρων
- Η συνδεσμολογία source/drain του μοντέλου ενσωματώνεται στους αλγορίθμους που περιγράφουν το μοντέλο PSP

Γενικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προτύπου PSP:

- Φυσική διατύπωση βασισμένη στο δυναμικό επιφάνειας τόσο για εγγενείς όσο και εξωγενείς ενότητες του μοντέλου
- Φυσική και ακριβής περιγραφή της περιοχής συσσώρευσης
- Συνυπολογισμός όλων των σχετικών φαινομένων μικρής-γεωμετρίας
- Σκέδαση Coulomb που επηρεάζει την κινητικότητα των ηλεκτρονίων του μοντέλου
- Κβαντομηχανικά φαινόμενα
- GIDL/GISL μοντέλο
- Το μοντέλο περιγράφει πολύ καλά τον θερμικό θόρυβο, τον flicker θόρυβο, και το θόρυβο βολής που εμφανίζεται στην πύλη

Κυριότερα σημεία:

Το μοντέλο PSP είναι ένα συμμετρικό, βασισμένο στο δυναμικό επιφάνειας, που δίνει μια ακριβή και φυσική περιγραφή της μετάβασης από αδύνατη σε ισχυρή αναστροφή. Επίσης περιλαμβάνει μια ακριβή περιγραφή όλων των φυσικών φαινομένων σημαντικών για τις σύγχρονες και μελλοντικές τεχνολογίες CMOS, όπως:

- Μείωση κινητικότητας
- Κορεσμός ταχύτητας
- Αποτελέσματα αγωγιμότητας (CLM, DIBL, κ.λπ.)
- Μηχανική πίεση σχετική με την STI
- Ακριβές και φυσικό ρεύμα διαρροής πυλών
- Διαρροή source-drain
- Μείωση πυλών

- Κβαντομηχανικά φαινόμενα
- Πληρέστερο πρότυπο θορύβου

Επιπλέον, το PSP δίνει μια ακριβή περιγραφή των φορτίων και των ρευμάτων, των πρώτων παραγώγων τους (αγωγιμότητα, χωρητικότητα) και των επόμενων. Έτσι έχουμε μια ακριβή περιγραφή της συμπεριφοράς του MOSFET, που μας επιτρέπει να συμπεραίνουμε πως το μοντέλο PSP «ταιριάζει» σε ψηφιακά, αναλογικά καθώς επίσης και σε κυκλώματα RF.

Ωστόσο, παρόλα που διαθέτουν επιμέρους πλεονεκτήματα, τα μοντέλα BSIM, HISIM, PSP έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που πηγάζει στο μαθηματικό τους υπόβαθρο, το οποίο δεν προσφέρεται ιδιαίτερα για υποστήριξη σχεδίασης αναλογικών κυκλωμάτων.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία αυτοματοποιημένου συστήματος μετατροπής παραμέτρων 'BSIM4 σε EKV3'. Συνεπώς η δημιουργία του συστήματος αυτού θα μας επιτρέπει τη χρήση του μοντέλου στο σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το EKV3 μοντέλο, όπου έχοντας τις “μετρήσεις” του BSIM4 με τη διαδικασία που περιγράφουμε λεπτομερώς στα επόμενα κεφάλαια καταλήγουμε να εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου EKV3. Παρουσιάζονται επίσης οι αρχές λειτουργίας του, ένα σύνολο φαινομένων που καλύπτονται από το μοντέλο αυτό καθώς αναφέρονται και στοιχεία που μας δίνουν να καταλάβουμε για ποιο λόγο υπερτερεί έναντι των άλλων μοντέλων.

Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα εξαγωγής παραμέτρων που ακολουθήσαμε, ώστε να δημιουργηθεί το αυτοματοποιημένο, όσο γίνεται, σύστημα εξαγωγής παραμέτρων. Παρατίθεται σύνολο γραφικών παραστάσεων από το οποίο μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε την προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων του ενός και του άλλου μοντέλου στην τεχνολογία των 90nm τόσο για NMOS όσο και για PMOS τρανζίστορ. Επίσης παρουσιάζονται όλες οι εξαγόμενες τιμές των παραμέτρων του

μοντέλου EKV3, καθώς και ένας πίνακας αρχικοποίησης παραμέτρων EKV3 από BSIM4 παραμέτρους.

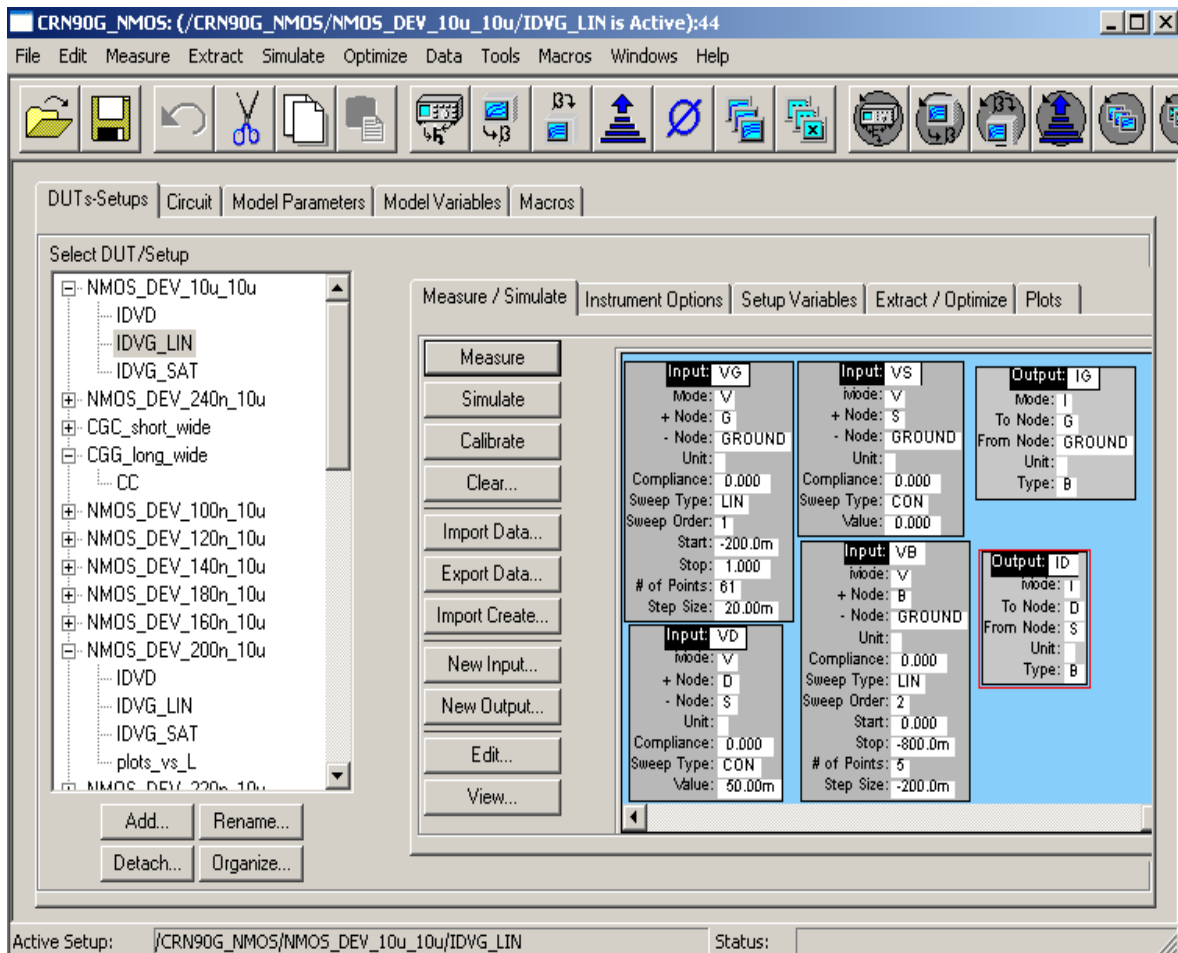
Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που καταλήξαμε ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία, καθώς προτείνεται και μελλοντική δουλειά για τη δημιουργία ενός ποιο αυτοματοποιημένου συστήματος καθώς επιδέχεται ακόμα περισσότερη βελτίωση για απόδοση σωστότερων τιμών των παραμέτρων στη δεδομένη τεχνολογία που μελετήσαμε.

1.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε είναι το Agilent ICCAP2006B και η κύρια χρησιμότητά του είναι να έχουμε τη δυνατότητα να θέσουμε τις τάσεις που εμείς επιθυμούμε στα Drain , Source , Gate και Bulk του τρανζίστορ προς μέτρηση για να αποκτήσουμε τις γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων και των διαγωγιμοτήτων και στη συνέχεια να δημιουργήσουμε τις βελτιστοποιήσεις που θα αποτελούν στην ουσία το σύστημα για την εξαγωγή των παραμέτρων.

1.3.1 Agilent ICCAP2006B

Στο λογισμικό του ICCAP υπάρχουν οι εξής καρτέλες : DUTs-Setups , Circuit , Model Parameters , Model Variables , Macros. Στην καρτέλα του DUTs-Setups , δημιουργούμε τα DUT και μέσα σε αυτά τα επιθυμητά Setup, που στην ουσία καθορίζουν τις τάσεις που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής των τάσεων ακολουθεί:



Σχήμα1.1:Εφαρμογή τάσεων μέσω του λογισμικού ICCAP

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρούμε τα εξής:

Στο αριστερό μέρος δημιουργούμε με χαρακτηριστικά ονόματα κάποια DUT τα ονόματα των οποίων περιέχουν τα μήκη (L) και τα πλάτη (W) του καναλιού του τρανζίστορ , ενώ μέσα σε κάθε DUT δημιουργούμε κάποια setup όπως το IDVG , IDVG_LIN , IDVG_SAT κ.λ.π.

Στο δεξί μέρος βλέπουμε το setup των τάσεων που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Αναλύοντας την τάση που εφαρμόζεται σαν είσοδος στο Gate (Vg) , παρατηρούμε πως είναι η τάση που εφαρμόζεται από τον κόμβο Gate στο ground. Το compliance δείχνει το ανώτερο σημείο που μπορεί να φτάσει το ρεύμα στον κόμβο αυτόν. Το sweep type δείχνει αν η τάση που εφαρμόζεται ως είσοδος μεταβάλλεται γραμμικά (LIN) ή αν παραμένει σταθερή (CON) . Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να εισάγουμε από ποια τιμή θα ξεκινήσει και σε ποια τιμή θα σταματήσει να εφαρμόζεται η αντίστοιχη τάση και πόσα σημεία θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η γραμμική μεταβολή. Στη δεύτερη περίπτωση θα πρέπει να εισάγουμε σταθερή τιμή τάσης. Σαν έξοδο επιλέγουμε ποιο ρεύμα

επιθυμούμε να δώσουμε στις γραφικές παραστάσεις που θα δημιουργηθούν. Στη συνέχεια φτιάχνουμε τις γραφικές παραστάσεις που θέλουμε να μελετήσουμε.

Επίσης στην καρτέλα Circuit φορτώνουμε τον Verilog-A κώδικα, που περιγράφει πλήρως το EKV3 μοντέλο, ενώ προσθέτουμε και τις παραμέτρους που βρίσκονται ήδη στον .na κώδικα. Τις τιμές αυτών των παραμέτρων πρέπει να εξάγουμε ώστε η θεωρητική προσέγγιση που θα παράγεται από τις εξισώσεις του μοντέλου EKV3 να συγκλίνουν με τις γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων που έχουμε από το μοντέλο BSIM4.4.

Οι παράμετροι αυτοί εμφανίζονται και στην καρτέλα Model Parameters. Τέλος στην καρτέλα Model Variables μπορούμε να προσθέσουμε κάποιες μεταβλητές και τις τιμές που ισούται η κάθε μια, καθώς μας δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούμε τις τιμές που επιθυμούμε αν αυτές είναι ίσες με τα ονόματα των μεταβλητών που προσθέσαμε στη λίστα αυτή. Οι παράμετροι που προσθέσαμε είμαι οι $I_{thsq}=1u$, $RRG=12$, $RRb=10$, $RRSB=1T$, $RRDSB=0$. Στην καρτέλα Macros γράφονται κάποιες μακροεντολές οι οποίες καλούν κάποιες εντολές και λειτουργίες του λογισμικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

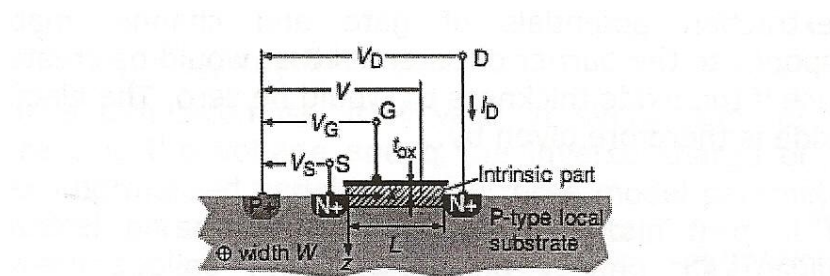
2. Μοντέλο EKV3

2.1 Μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση φορτίου

Οι απαιτήσεις για αποδοτικά μοντέλα MOS αναλογικής προσομοίωσης, όπως η ακρίβεια και η συνοχή των μεγάλων και μικρών χαρακτηριστικών σημάτων είναι καθιερωμένες. Το μοντέλο EKV3 MOSFET σχεδιάστηκε προκειμένου να υπάρχουν η υπολογιστική αποδοτικότητα, η ευκολία της εξαγωγής παραμέτρου και η ανάγκη του σχεδιαστή για τη διορατικότητα στη συμπεριφορά των συσκευών.

Το EKV3 είναι ένα μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση φορτίου το οποίο αρχικά υπολογίζει την εξάρτηση της πυκνότητας Q_i που προκαλείται από την κινητικότητα των φορτίων στις τάσεις του τρανζίστορ. Στηρίζεται στο Q_i και στις ιδιαίτερες τιμές του Q_{iS} και Q_{iD} , στις άκρες source και drain του καναλιού αντίστοιχα, για να υπολογίσουν το ρεύμα αγωγών και να διαμορφώσουν όλες τις διαστάσεις στη συμπεριφορά της συσκευής. Ακολουθεί μια μικρή ανάλυση.

Για μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο στη επιφάνεια πυριτίου η δομή των source και drain αντιστοιχούν σε δυο back to back διόδους που συνδέονται σε σειρά. Κατά συνέπεια, πέραν των συνδέσεων του ρεύματος διαρροής κανένα άλλο ρεύμα δε μπορεί να ρεύσει εφ' όσον η V_S και η V_D είναι θετικές. Η κατάσταση παραμένει ποιοτικά η ίδια όταν προσελκύονται περισσότερες οπές στην επιφάνεια με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης στην πύλη V_G .



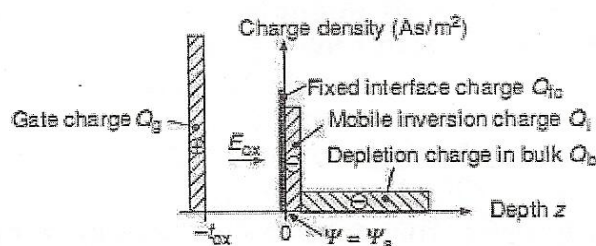
Σχήμα2.1: Διατομή ενός MOS τρανζίστορ

Αντίθετα, εάν μια θετική τάση εφαρμόζεται στην πύλη, οι οπές αναγκάζονται να απομακρυνθούν από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί αρνητικό φορτίο πυκνότητας Q_b ανά περιοχή. Αυτό το φορτίο ακινητοποιείται και επομένως δεν μπορεί να φέρει οποιοδήποτε ρεύμα. Με την περαιτέρω αύξηση V_G , τα αρνητικά ηλεκτρόνια προσελκύονται στην επιφάνεια και με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένα κανάλι N-type. Είναι αυτό το αρνητικό κινητικό φορτίο αναστροφής, της πυκνότητας Q_i ανά περιοχή, που θα φέρει τον αγωγό στο ρεύμα πηγής από έναν συνδυασμό μηχανισμών κλίσης και διάχυσης των ηλεκτρονίων. Για τη N-channel συσκευή, το I_D είναι θετικό εάν εισάγει το τερματικό drain.

Το συνολικό καθαρό φορτίο που προκαλείται κάτω από την επιφάνεια του πυριτίου ανά περιοχή του καναλιού δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$Q_{si} = Q_b + Q_i$$

Ένα ακόμη μέρος φορτίου το Q_{fc} είναι παρόν στη διεπαφή πυριτίου-οξειδίου. Αυτό το φορτίο περιλαμβάνει την επίδραση των φορτίων που παγιδεύονται μέσα στο οξείδιο και σταθμίζονται από τη σχετική απόστασή τους στη διεπαφή. Το φορτίο αυτό είναι ανεξάρτητο από την τάση πυλών, ακόμη και αν αλλάξουμε την τιμή της τάσης πύλης αργά αργά σε όλο και υψηλότερες τιμές.



Σχήμα2.2: περιγραφή των πυκνοτήτων διαφόρων φορτίων

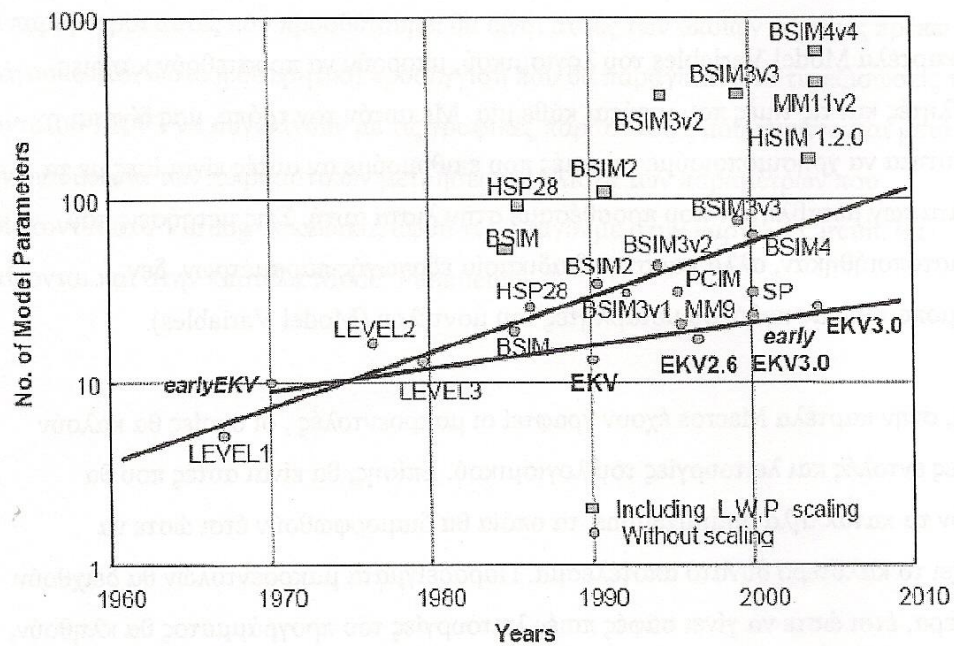
Η τιμή 0 της συνιστώσας του ηλεκτροστατικού δυναμικού ψ σημαίνει πως ο όγκος του πυριτίου, σε μια απόσταση από την επιφάνεια, δεν επηρεάζεται από την τάση πυλών. Στην επιφάνεια πυριτίου, το ψ παίρνει την ιδιαίτερη τιμή ψ_s που ονομάζεται δυναμικό επιφάνειας. Το ηλεκτρικό πεδίο E_{ox} στο οξείδιο εξαρτάται από τη διαφορά $V_G - \psi_s - \Phi_{ms}$

όπου Φ_{ms} το δυναμικό επαφών του υλικού σωμάτων στο υλικό πυλών. Ενώ αντιστοιχεί στον περιορισμό του δυναμικού που θα δημιουργούταν στη διεπαφή τους εάν το πάχος οξειδίου t_{ox} θα ήταν μηδέν. Το ηλεκτρικό πεδίο στο οξείδιο επομένως δίνεται από τη σχέση:

$$E_{ox} = \frac{V_G - \Phi_{ms} - \Psi_s}{t_{ox}}$$

2.2 Γενικές πληροφορίες

Συγκεκριμένα ξεκίνησε να εφαρμόζεται στην αρχή της δεκαετίας του 1970. Από πολύ νωρίς εισήχθησαν κανονικοποιημένες μορφές για το ρεύμα αλλά και για τις τάσεις. Από τις πρώτες κιόλας εκδόσεις, το μοντέλο είχε προσομοιώσει την περιοχή της μέτριας αναστροφής, χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση ρεύματος – τάσης. Είναι βασισμένο στην ανάλυση φορτίου, όπως εξηγήσαμε παραπάνω, και χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση αναλογικών αλλά και RF κυκλωμάτων. Βασίζεται στη φυσική και ισχύει για όλο το φάσμα λειτουργίας του MOSFET. Περιέχει απλές αλλά αναλυτικές εξισώσεις και καλύπτει πολλά από τα φαινόμενα και τη συμπεριφορά του μοντέλου σε ασθενή, μέτρια και ισχυρή αναστροφή. Είναι διαθέσιμο σε μορφή Verilog-A κώδικα. Τέλος πρέπει να τονίσουμε πως το μοντέλο EKV3 έχει όσο το δυνατόν λιγότερες παραμέτρους και όπως φαίνεται παρακάτω από το διάγραμμα έχει πολύ λιγότερες παραμέτρους από αντίστοιχα μοντέλα που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο π.χ. BSIM4, PSP, HISIM[1].



Σχήμα2.3: Αριθμός παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου

2.2.1 Ορισμός βασικών μεγεθών του EKV3 και γενικές εξισώσεις

Παρουσιάζουμε τα βασικά μεγέθη του μοντέλου[1]:

- ✓ Μήκος και πλάτος καναλιού: W, L [μm]
- ✓ Δυναμικό σώμα – πύλη: Φ_{MS} [V]
- ✓ Δυναμικό στο οξείδιο: Ψ_{OX} [V]
- ✓ Δυναμικό στην επιφάνεια: Ψ_S [V]
- ✓ Φορτίο πύλης: Q'_G [C/m^2]
- ✓ Φορτίο οξειδίου: Q'_{OX} [C/m^2]
- ✓ Φορτίο στον ημιαγωγό: Q'_C [C/m^2]

- ✓ Χωρητικότητα οξειδίου ανά μονάδα επιφάνειας: C'_{ox} [F/m²]

$$\text{Όπου } C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$$

- ✓ Δυναμικό επαφής: V_{FB} [V]

$$\text{Όπου } V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q'_{ox}}{C'_{ox}}$$

- ✓ Θερμοδυναμική τάση : U_T [V]

$$\text{Όπου } U_T = \frac{kT}{q}$$

με q το φορτίο του ηλεκτρονίου και με k τη σταθερά Boltzmann

- ✓ Δείκτης σώματος : γ [V^{-1/2}]

$$\text{Όπου } \gamma = \sqrt{2q\epsilon_{si}N_{sub}}/C'_{ox}$$

- ✓ Δυναμικό quasi-fermi : Φ_F [V]

$$\text{Όπου } \Phi_F = U_T \ln\left(\frac{N_{sub}}{ni}\right)$$

Με κατ' όγκο συγκέντρωση ηλεκτρονίων ni ατόμων νόθευσης N_{SUB}

Επίσης ισχύει $C_{ox} = Q'_G / C'_{ox}$

Και $V_B - V_{FB} = \Psi_S - Q'_C / C'_{ox}$

Συγκέντρωση φορτίων αναστροφής Q'_i και αραίωσης Q'_b , με $Q'_C = Q'_i + Q'_b$

Αν ισχύει $\Psi_S > 0$,

τότε $Q'b \cong -\gamma C_{ox} \sqrt{\psi_S}$

Και $V_G - V_{FB} = \psi_S + \gamma \sqrt{\psi_S} - Q'i / C'_{ox}$

✓ Δυναμικό 'pinch-off': V_P [V]

Όπου $V_P = \psi_{SP} - \psi_0$

✓ Κλίση n: $n = \left[\frac{\partial \psi_{SP}}{\partial V_G} \right]^{-1} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_{sp}}} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_0 + V_P}}$

✓ Τάση κατωφλίου: V_{T0} [V]

Όπου $V_{T0} = V_{FB} + \psi_0 + \gamma \sqrt{\psi_0}$

Από τα παραπάνω προκύπτει

$$V_P = V'_G - \psi_0 - \gamma$$

$$V_{T0} = V_{FB} + \psi_0 + \gamma$$

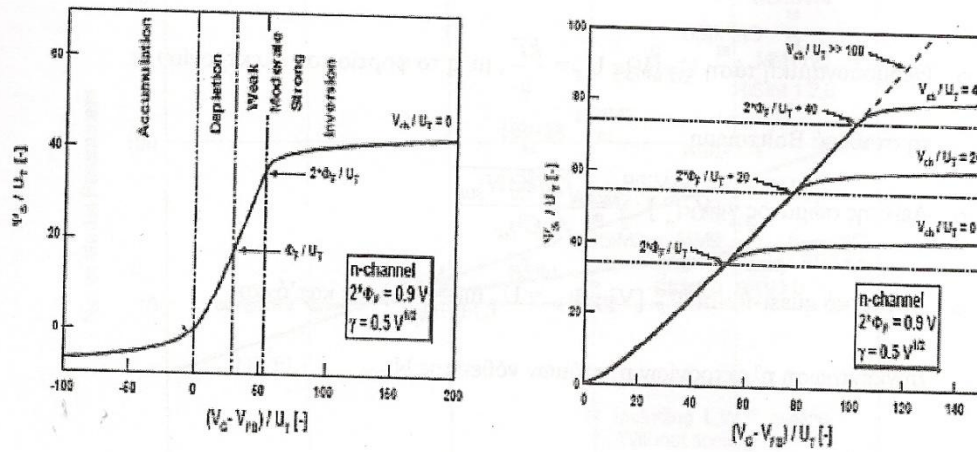
Από τα παραπάνω , προκύπτει:

$$V_P = V'_G - \psi_0 - \gamma \left(\sqrt{V'_G + 0} \right)^2 - \frac{\gamma}{2}$$

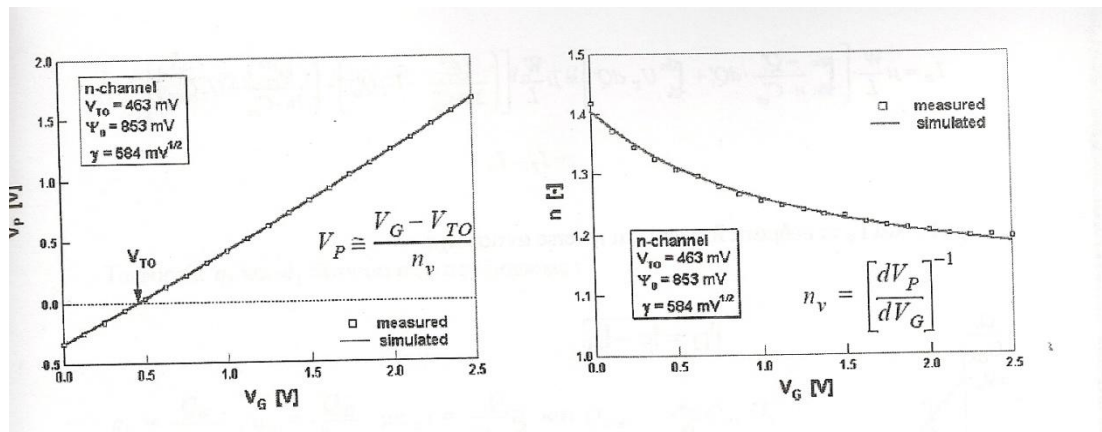
Και $V'_G = V_G - V_{FB} = V_G - V_{T0} + \psi_0 + \gamma$

Μια πολύ χρήσιμη προσέγγιση της V_P είναι:

$$V_P \cong \frac{V_G - V_{T0}}{n}$$



Σχήμα2.4: Λειτουργία του MOSFET ανάλογα με V_G , V_{FB} , Φ_F , V_{CH}



Σχημα2.5: V_P vs V_G , n vs V_G

2.2.2 Ρεύμα καναλιού

Το ρεύμα στο κανάλι δίνεται από την εξίσωση:

$$I_D = \mu W (-Q'_i) \frac{dV_{ch}}{dx} = \mu W (-Q'_i) \frac{d\psi_s}{dx} + U_T \frac{dQ'_i}{dx}$$

Με μια γραμμική προσέγγιση, έχουμε:

$$\frac{\partial \Psi_s}{\partial x} \cong \frac{1}{n \cdot C'_{ox}} \frac{\partial Q'_i}{\partial x}$$

Συνδέοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση :

$$I_D|_x = \mu W \cdot \left[-\frac{Q'_i(x)}{n \cdot C'_{ox}} + U_T \right] \frac{\partial Q'_i}{\partial x}$$

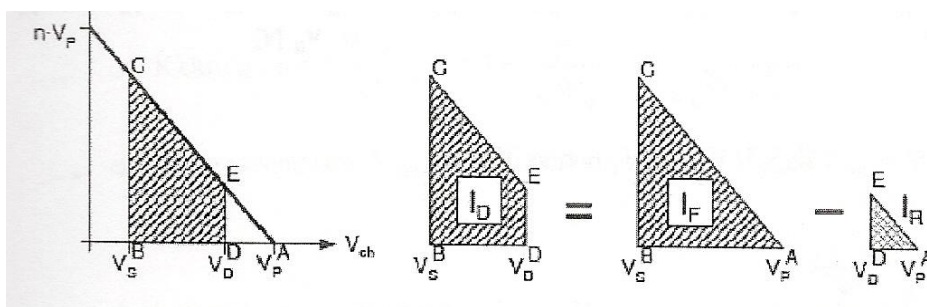
Ολοκληρώνοντας ως προς το κανάλι και θεωρώντας ότι το ρεύμα παραμένει σταθερό σε όλο το κανάλι καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση:

$$I_D = \mu \frac{W}{L} \cdot \left[\int_{Q'_s}^{Q'_{ds}} \frac{-Q'_i}{n \cdot C'_{ox}} \cdot dQ'_i + \int_{Q'_s}^{Q'_{ds}} U_T \cdot dQ'_i \right] = \mu \frac{W}{L} \cdot \left[\left(\frac{Q'_{ds}{}^2}{2n \cdot C'_{ox}} + U_T Q'_{ds} \right) - \left(\frac{Q'_{is}{}^2}{2n \cdot C'_{ox}} + U_T Q'_{is} \right) \right]$$

$$= I_F - I_R$$

Όπου I_F και I_R τα ρεύματα forward και reverse αντίστοιχα.

$$I_D = I_F - I_R$$



$$I_D = \beta \cdot \int_{V_S}^{V_D} \frac{-Q_i}{C_{ox}} \cdot dV_{ch} = \underbrace{\beta \cdot \int_{V_S}^{+\infty} \frac{-Q_i}{C_{ox}} \cdot dV_{ch}}_{\text{forward current } I_F \text{ controlled by } V_P - V_S} - \underbrace{\beta \cdot \int_{V_D}^{+\infty} \frac{-Q_i}{C_{ox}} \cdot dV_{ch}}_{\text{reverse current } I_R \text{ controlled by } V_P - V_D}$$

Όμως γνωρίζουμε ότι

$$I_D = I_{SPEC} (i_f - i_r)$$

όπου

$$I_{SPEC} = 2n\beta U_T^2$$

Επίσης

$$\beta = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

και

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

Επίσης το ρεύμα καναλιού εξαρτάται μόνο από τα φορτία αναστροφής στο source q_s και στο drain q_D

$$i_f = \frac{IF}{I_{SPEC}} = q_s^2 + q_s$$

Και

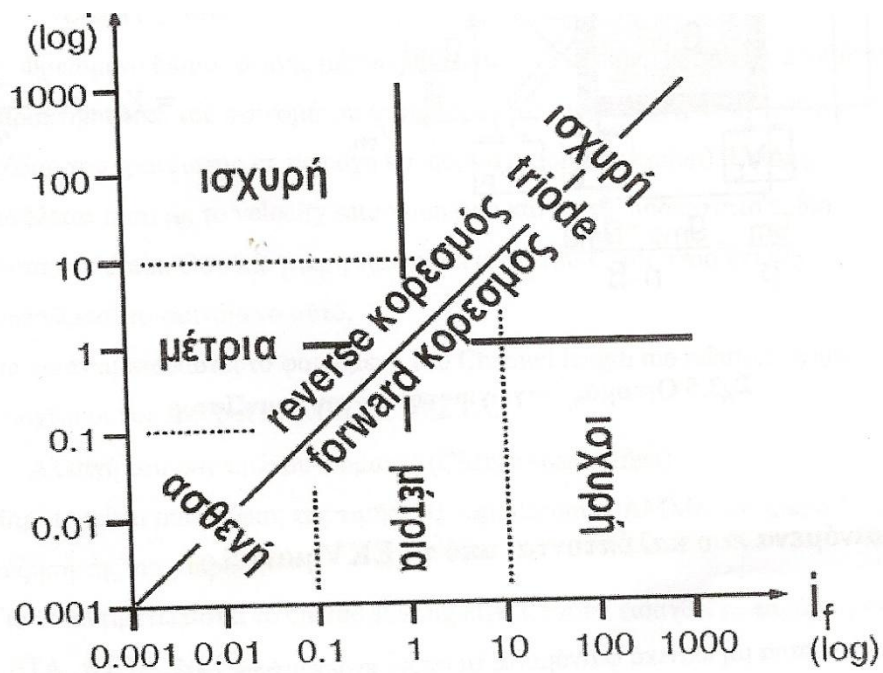
$$i_r = \frac{IR}{I_{SPEC}} = q_D^2 + q_D$$

όπου

$$q_s = \frac{Q_{iS}}{Q_{SPEC}} \quad \text{και} \quad q_D = \frac{Q_{iD}}{Q_{SPEC}}$$

όπου

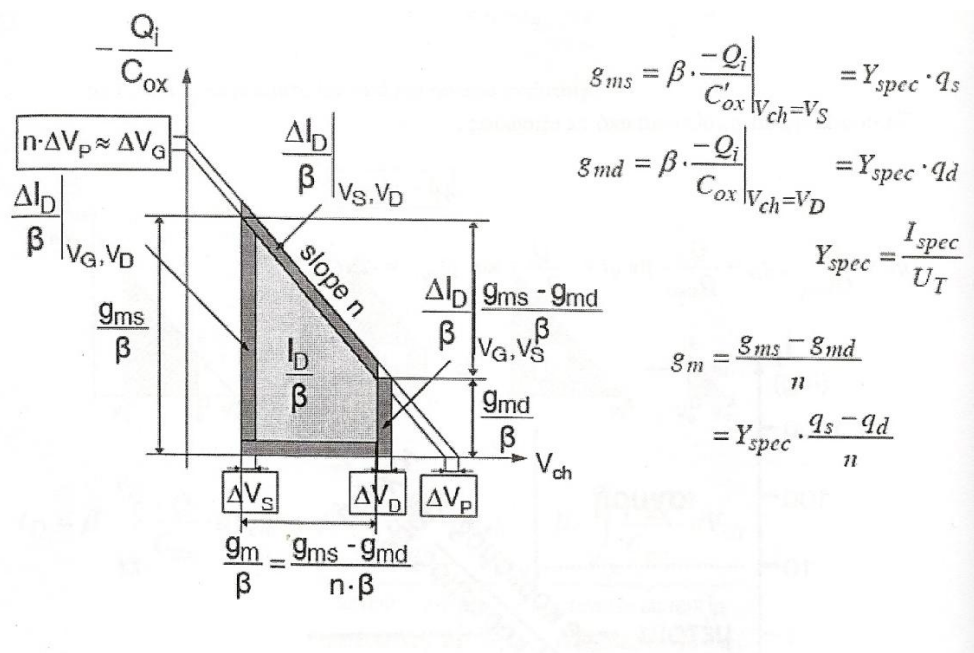
$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{SPEC}} \quad \text{και} \quad Q_{SPEC} = -2n C_{ox} U_T$$



Σχήμα2.6: Επίπεδα αναστροφής MOS τρανζίστορ (ως προς τα κανονικοποιημένα ρεύματα i_i και i_f)

2.2.3 Διαγωγιμότητα και φορτία

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διαγωγιμότητες του τρανζίστορ:



Σχήμα2.7: Ορισμός διαγωγιμοτήτων του τρανζίστορ

2.3 Φαινόμενα και παράμετροι συσχέτισης

Για να χαρακτηρίσουμε ένα μοντέλο MOSFET ακριβές, θα πρέπει να έχει την ικανότητα να χρησιμοποιείται από όσο το δυνατόν περισσότερες τεχνολογίες. Υπάρχουν κάποια μη ιδανικά φαινόμενα που ίσως επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση του MOSFET. Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων έχει ισχυθεί ένα πλήθος παραμέτρων, που η μοντελοποίησή τους από το EKV να γίνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και οι προσομοιώσεις των κυκλωμάτων με τη χρήση των παραμέτρων αυτών να βρίσκονται όσο πιο κοντά γίνεται σε πραγματικές συνθήκες[5].

2.3.1 Φαινόμενα ανώτερης τάξης σε διατάξεις μεγάλων διαστάσεων

Εξάρτηση κινητικότητας από το κάθετο πεδίο

Η τιμή της κινητικότητας είναι ανεξάρτητη της θέσης στο κανάλι και αυτό ισχύει μιας και το αναστρεφόμενο φορτίο είναι ανομοιογενές κατά μήκος του καναλιού. Η κινητικότητα επηρεάζεται από την τιμή του κάθετου πεδίου

1) Σκέδαση επιφάνειας (surface scattering)

Η επίδραση του φαινομένου σκέδασης επιφανείας εξαρτάται από το κάθετο πεδίο εσωτερικά του καναλιού. Όμως δεν είναι η μέγιστη τιμή του που ορίζει την κινητικότητα αλλά μια μικρότερη ενεργή τιμή εξ αιτίας της ύπαρξης του φαινομένου σκέδασης επιφάνειας. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το παραπάνω φαινόμενο είναι E_0 , E_1 , και η_{TA}

2) Σκέδαση Coulomb (Coulomb scattering)

Ένας άλλος μηχανισμός σκέδασης που αφορά την κινητικότητα των ηλεκτρονίων στη διάσταση είναι η σκέδαση Coulomb. Το φαινόμενο αυτό επηρέαζε τις διατάξεις MOSFET σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στις μοντέρνες τεχνολογίες όμως παρατηρείται μια αύξηση της έντασης του φαινομένου τέτοια ώστε ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου να μην μπορεί να αγνοηθεί. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το παραπάνω φαινόμενο είναι οι Z_C και THC

Απογύμνωση πολυκρυσταλλικού πυριτίου της πύλης

Στις σύγχρονες τεχνολογίες το υλικό της πύλης που χρησιμοποιείται είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο εμπλουτισμένο έντονα ώστε να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν μέταλλο. Για την υλοποίηση της πύλης με αυτήν την τεχνική συνηθίζεται να εμπλουτίζεται το υλικό της πύλης μαζί με τις περιοχές των ακροδεκτών source και drain, ώστε να δημιουργηθεί μια συγκέντρωση φορέων στην πύλη αντίθετου τύπου φορέα ρεύματος σε σχέση με το υπόστρωμα. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το παραπάνω φαινόμενο είναι GAMMAG και TG, όπου η τελευταία παράμετρος ισούται με -1 στην περίπτωση που η έγχυση γίνεται με φορείς διαφορετικού τύπου από αυτούς του υποστρώματος, με +1 στην περίπτωση που οι φορείς της πύλης είναι ίδιου τύπου με το υπόστρωμα και με 0 όταν το υλικό στην πύλη χαρακτηρίζεται από τόσο μεγάλη αγωγιμότητα οπότε και το φαινόμενο μπορεί να αγνοηθεί.

Κβαντικά Φαινόμενα

Όσο το πάχος του οξειδίου της πύλης παίρνει όλο και μικρότερες τιμές, τα κβαντικά φαινόμενα που εμφανίζονται στην πύλη αποκτούν όλο και μεγαλύτερη σημασία στην απόκριση του τρανζίστορ. Το μικρότερο πάχος του οξειδίου οδηγεί σε μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο στο κανάλι, δεδομένης της μη αναλογικής μείωσης των τάσεων της πόλωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ενεργειακού χάσματος (band gap) που χρειάζεται ένας φορέας ρεύματος να καλύψει για να βρεθεί σε ελεύθερη κατάσταση αγωγιμότητας. Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα κβαντικά φαινόμενα είναι AQMA, AQMI και ETAQM.

Μετακίνηση τάσης κατωφλίου λόγω της τάσης στον ακροδέκτη drain σε διατάξεις ανομοιογενούς κατά μήκος συγκέντρωσης του σώματος (pocket implants)

Σε τρανζίστορ με πολύ μικρά μήκη καναλιού εμφανίζεται το φαινόμενο του διαπερασμού (punchthrough). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στην απευθείας σύνδεση των περιοχών του source και drain, όχι δια μέσω του καναλιού αλλά λόγω της επέκτασής τους, με την αύξηση της τάσης VSB και κυρίως της VDB. Για να αποφύγουμε το πρόβλημα του διαπερασμού (punchthrough) συνηθίζεται η δημιουργία ενός ανομοιογενούς προφίλ κατά μήκος του καναλιού. Επιλέγεται στα άκρα του καναλιού, και σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό της περιοχής source και drain, η συγκέντρωση να είναι υψηλότερη έτσι ώστε να

περιορίζεται η επέκταση των ενεργών περιοχών κατά μήκος του καναλιού. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι το κανάλι να χαρακτηρίζεται από μια ανομοιογένεια που πρέπει να μοντελοποιηθεί. Αυτές οι εγχύσεις εκατέρωθεν του καναλιού ονομάζονται rockets. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό είναι FPROUT, PDITS, PDITSL, PDITSD, DDITS.

2.3.2 Φαινόμενα κοντού καναλιού (short channel effects)

Μέχρι τώρα μελετήσαμε τρανζίστορ με μεγάλες διαστάσεις. Ωστόσο, τρανζίστορ με μικρό μήκος καναλιού είναι σημαντικά στην σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, τόσο των αναλογικών όσο και των ψηφιακών. Παρακάτω παρουσιάζουμε διάφορα φαινόμενα μικρών διαστάσεων.

Κορεσμός ταχύτητας (velocity saturation)

Στον οριζόντιο άξονα το πεδίο εξαρτάται ανάλογα από την τάση στα άκρα του καναλιού, και αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με το μήκος του καναλιού. Η ταχύτητα των φορέων ρεύματος θα είναι ανάλογη του οριζόντιου πεδίου σε κάθε σημείο. Από την άλλη όμως υπάρχει μια μέγιστη δυνατή τιμή της ταχύτητας των φορέων. Συνεπώς, η γραμμική σχέση μεταξύ οριζόντιου πεδίου και της ταχύτητας των φορέων διατηρείται μόνο για χαμηλά πεδία, ενώ για μεγαλύτερες τιμές η ταχύτητα θα συγκλίνει προς μια μέγιστη τιμή. Αυτό είναι το φαινόμενο ταχύτητας κορεσμού και οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό είναι UCRIT και DELTA.

Διαμόρφωση μήκους καναλιού (Channel Length Modulation, CLM)

Όπως αναφέραμε και παραπάνω το κανάλι μπορεί να διαχωριστεί σε ένα μέρος που συμβαίνει ο κορεσμός ταχύτητας και ένα υπόλοιπο γραμμικό. Έτσι εκτός από την τάση στην άκρη του γραμμικού μέρους του καναλιού, θα πρέπει να υπολογιστεί και το μήκος του, που θα είναι κατά κάτι μικρότερο του όλου. Αυτό καλείται διαμόρφωση καναλιού και οι παράγοντες που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό είναι οι LAMBDA και ACLM.

Ανάστροφο φαινόμενο κοντού καναλιού (Reverse Short Channel Effect, RSCE)

Οι εγχύσεις στα άκρα του καναλιού χρειάζονται για να αποφεύγεται η απευθείας σύνδεση των ενεργών περιοχών των source και drain σε τρανζίστορ μικρού μήκους. Από

την άλλη η αυξημένη συγκέντρωση στα άκρα του καναλιού , επηρεάζει την τιμή της μέσης τιμής της συγκέντρωσης σε όλο το κανάλι. Αυτή η επιρροή είναι εντονότερη στα τρανζίστορ με κανάλια μικρού μήκους , καθώς σε αυτά η έκταση των rocket implants καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό του καναλιού και ονομάζεται ανάστροφο φαινόμενο κοντού καναλιού.

Η επίδραση της ενεργής τιμής της συγκέντρωσης επηρεάζει την τάση κατωφλίου , τον συντελεστή φαινομένου σώματος καθώς και την τάση Fermi. Οι παράγοντες που σχετίζονται με αυτό το φαινόμενο είναι LR, QLR , NLR και FLR.

Συνδιαμόρφωση φορτίου στον άξονα του μήκους (Charge Sharing effect, CS)

Το φαινόμενο της συνδιαμόρφωσης φορτίου εμφανίζεται τόσο στα τρανζίστορ μικρού μήκους όσο και σε αυτά μικρού πλάτους. Το φαινόμενο αυτό συνίσταται στην επιρροή των τάσεων στους ακροδέκτες στα άκρα του καναλιού πάνω στο κανάλι. Ένα σημείο του καναλιού σχετικά στην μέση επηρεάζεται πιο πολύ από τις τάσεις στην πύλη και το υπόστρωμα. Οι περιοχές όμως , στα άκρα διαμορφώνονται και από την πόλωση των παρασιτικών διόδων που δημιουργούνται μεταξύ των ακροδεκτών source και drain από τη μια και του υποστρώματος από άλλη. Έτσι συνεπώς επηρεάζεται η ενεργή τιμή του συντελεστή φαινομένου σώματος(γ) από τις τάσεις στους ακροδέκτες source και drain. Συγκεκριμένα , καθώς αυξάνονται οι τιμές VSB και VDB , ο συντελεστής γ μειώνεται. Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό το φαινόμενο είναι οι LETA, LETA0, LETA2, WETA και NCS.

Πτώση φράγματος λόγω της τάσης στο drain (Drain Induced Barrier Lowering, DIBL)

Εκτός από την ενεργή τιμή του συντελεστή φαινομένου σώματος , οι τάσεις στους ακροδέκτες στα άκρα του καναλιού επηρεάζουν και το δυναμικό επιφανείας κατά μήκος του καναλιού. Ως δεδομένο η τάση στους ακροδέκτες είναι υψηλότερη από την τάση στην πηγή , το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πτώση φράγματος λόγω της τάσης στο drain και αυξήσεις στην τάση των ακροδεκτών φέρει μειώσεις στην τάση μηδενικού φορτίου (V_p). Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό το φαινόμενο είναι οι ETAD και SIGMAD.

Χωρητικότητα επικάλυψης (overlap capacitance)

Το οξειδίο κάτω από την πύλη , τοποθετείται για να μπορεί να ελεγχθεί το επίπεδο αναστροφής της περιοχής του υποστρώματος που είναι ανάμεσα από τους ακροδέκτες drain και source, και να δημιουργηθεί το κανάλι. Το οξειδίο αυτό δημιουργεί τη χωρητικότητα ανάμεσα από την πύλη και το υπόστρωμα. Ωστόσο το μήκος του οξειδίου, είναι λίγο μεγαλύτερο της απόστασης μεταξύ των ακροδεκτών source και drain και έτσι ,ένα μέρος του , στα δύο άκρα , βρίσκεται ανάμεσα από τον ακροδέκτη της πύλης και τους ακροδέκτες source και drain. Σε αυτές τις περιοχές δημιουργούνται δύο παρασιτικές χωρητικότητες επικάλυψης, που σε τρανζίστορ μεγάλου μήκους η τιμή τους είναι σχεδόν αμελητέα. Οι παράμετροι που αντιστοιχούν στο φαινόμενο χωρητικότητα επικάλυψης είναι οι GAMMAOV , GAMMAGOV , VFBOV , LOV , VOV , CGSO , CGDO και CGBO.

Χωρητικότητα θυσάνωσης (fringing capacitance)

Εκτός από την χωρητικότητα επικάλυψης , εμφανίζεται άλλη μια παρασιτική επικοινωνία μεταξύ του ακροδέκτη της πύλης και των source και drain, η οποία ονομάζεται χωρητικότητα θυσάνωσης και μπορεί να κατατμηθεί σε δύο συνιστώσες , την εσωτερική και την εξωτερική. Η πρώτη σχετίζεται με το πεδίο που εμφανίζεται μεταξύ του ακροδέκτη της πύλης και των source και drain, και οι γραμμές του περνούν μέσα από το κανάλι και όχι μόνο μέσα από το οξειδίο. Η τιμή της εξαρτάται από την συγκέντρωση του φορτίου στο κανάλι. Η δεύτερη αναφέρεται στο πεδίο και σχηματίζεται ανάμεσα από την πύλη και τους ακροδέκτες source και drain, όπως και το υπόστρωμα , αλλά δεν διαπερνά ούτε το κανάλι ούτε αποκλειστικά το οξειδίο. Η τιμή της μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της πόλωσης και ότι σχετίζεται αποκλειστικά με τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών της τεχνολογίας. Οι παράμετροι με το φαινόμενο αυτό είναι οι KJF , CJF , VFR και DFR.

Εν σειρά αντίσταση (series resistance)

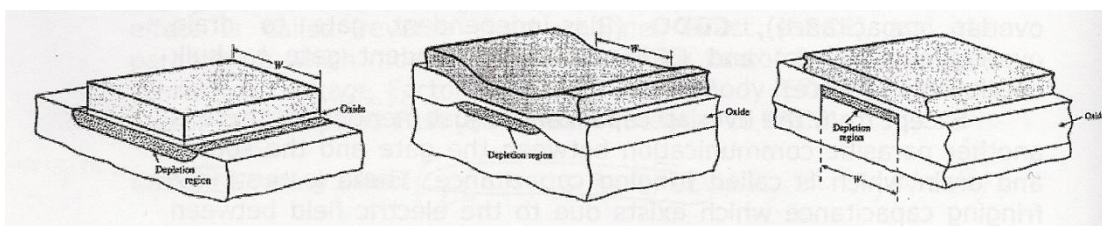
Παρά το γεγονός ότι στα τρανζίστορ μεγάλου μήκους έχει θεωρηθεί πως όλοι οι ακροδέκτες έχουν αμελητέα αντίσταση , στα τρανζίστορ μικρού μήκους παρατηρείται ότι η μικρή αντίσταση που εμφανίζεται εσωτερικά της ενεργού περιοχής των ακροδεκτών source και drain δημιουργεί μια αρκετά σημαντική πτώση τάσης έτσι ώστε η πραγματική διαφορά δυναμικού στα άκρα του καναλιού και έτσι το ρεύμα αυτού είναι σημαντικά μικρότερο από την διαφορά δυναμικού των δύο ακροδεκτών εξωτερικά. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το παραπάνω φαινόμενο είναι οι RSH , RS και RD.

2.3.3 Φαινόμενα στενού καναλιού (narrow channel effects)

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποια φαινόμενα που εμφανίζονται εντονότερα σε τρανζίστορ μικρού πλάτους.

Αντίστροφο φαινόμενο στενού καναλιού (inverse narrow channel effect)

Στην πραγματικότητα προκειμένου να ενισχυθεί η ηλεκτρική απομόνωση της διάταξης από γειτονικές, τοποθετούνται μονωτικά τοιχώματα πλευρικά του καναλιού. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές βάσει των οποίων πραγματοποιείται αυτό. Η πρώτη ονομάζεται LOCOS και λειτουργεί με τον ακόλουθο τρόπο. Όπου το οξείδιο που δημιουργείται στα άκρα του καναλιού παρουσιάζει αύξηση σε πλάτος σταδιακά καθώς απομακρύνεται από το κανάλι, παρατηρείται ότι στα τρανζίστορ στενού καναλιού η τάση κατωφλίου αυξάνεται καθώς το όριο του καναλιού εκτείνεται και πέρα από το άκρο της πύλης, και το ακριανό μέρος ελέγχεται δυσκολότερα από την τάση στην πύλη. Η δεύτερη τεχνική ονομάζεται STI και ορίζεται ως εξής. Το οξείδιο ορίζει απότομα και κάθετα το τέλος του καναλιού και στην περίπτωση των στενών τρανζίστορ, μέσω της εξωτερικής χωρητικότητας θυσάνωσης γίνεται ευκολότερο να ελεγχθεί το κανάλι από την τάση στην πύλη, ή αλλιώς μειώνεται η τάση κατωφλίου.



Πλευρική αγωγή (edge conductance)

Σε μερικές τεχνολογίες το μέρος του καναλιού που βρίσκεται στα δύο άκρα κατά πλάτος, έχει τόσο διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από το υπόλοιπο μέσω κανάλι που η θεώρηση μιας μέσης τιμής αυτών σε ένα ομοιογενές κανάλι, δεν είναι αρκετό. Έτσι απαιτείται μια πιο μακροσκοπική θεώρηση που χρησιμοποιεί την κατάτμηση του τρανζίστορ σε δυο συμπληρωματικά. Το μεν βασικό αποτελείται από το μεγαλύτερο μέρος της διάταξης που βρίσκεται το κέντρο ως προς τον άξονα του πλάτους, ενώ το

δεύτερο αποτελείται από τις δύο λωρίδες που βρίσκονται στα άκρα. Στην περιοχή της ασθενούς αναστροφής και στην περίπτωση που η τάση κατωφλίου του πλευρικού τρανζίστορ είναι μικρότερη του μεσαίου, παρατηρείται ότι θα άγει πρώτα το πλευρικό τρανζίστορ και θα επικρατεί το ρεύμα αυτού. Στην περιοχή της ισχυρής αναστροφής και των δύο θα ισχύει το αντίθετο. Οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτό το φαινόμενο είναι οι WEDGE, DGAMMAEDGE και DPHIEDGE.

2.3.3.1 Φαινόμενα που σχετίζονται με την θερμοκρασία (Effects related to temperature)

Τα χαρακτηριστικά των τρανζίστορ είναι πολύ έντονα εξαρτώμενα με τη θερμοκρασία. Η εξάρτηση της τάσης Fermi από τη θερμοκρασία είναι σχεδόν γραμμική ενώ στηρίζεται κυρίως στην εξάρτηση από τη θερμοκρασιακά μεταβαλλόμενη εσωτερική συγκέντρωση φορέων. Επίσης η τάση κατωφλίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, μείωση της τάσης κατωφλίου, οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος στις μικρές τιμές της τάσης στην πύλη. Από την άλλη αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μια πτώση της κινητικότητας, που ερμηνεύεται ως μια πτώση του ρεύματος για μεγάλες τιμές της τάσης στην πύλη, ή αλλιώς στην ισχυρή αναστροφή.

Παράγοντες που σχετίζονται με τη θερμοκρασία είναι TNOM, TETA, TLAMBDA, TCV, BEX, UCX, TE1EX, TE0EX, TR και TR2.

2.3.4 Λοιπά φαινόμενα καναλιού

Φαινόμενο πίεσης δομής απομόνωσης ρηχής τάφρου (Shallow Trench Isolation (STI) stress effect)

Σε μελέτη φαινομένου σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε η επίδραση των δομών απομόνωσης των τρανζίστορ πάνω στις ηλεκτρικές ιδιότητές τους. Σχετικά με την τεχνική STI, αναφέρθηκε ότι το κανάλι επηρεάζεται διαφορετικά στα άκρα του από ότι στο μέσο, με συνέπεια τα στενά τρανζίστορ να εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα πιο πλατιά, όπου η διαφοροποίηση στα άκρα είναι αμελητέα. Από την άλλη, οι STI δομές ασκούν μια πίεση στον ημιαγωγό του υποστρώματος επηρεάζοντας τοπικά τις ηλεκτρικές ιδιότητές του. Ανάλογη με την απόσταση από την δομή είναι και η πίεση η οποία ασκείται τοπικά σε κάθε σημείο του ημιαγωγού. Έτσι η επίδραση της πίεσης στο τρανζίστορ εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της STI δομής και του καναλιού. Αυτή η

επίδραση είναι πιο πολύπλοκη σε τρανζίστορ με μεγαλύτερο πλήθος δαχτύλων. Συγκεκριμένα η πίεση των STI δομών επηρεάζουν την κινητικότητα καθώς και την συγκέντρωση των φορτίων και συνεπώς την τάση κατωφλίου καθώς και τον συντελεστή φαινομένου σώματος. Επίσης επηρεάζονται οι παράμετροι που σχετίζονται με μερικά φαινόμενα κοντού καναλιού, το φαινόμενο κορεσμού ταχύτητας και το DIBL. Οι παράμετροι που σχετίζονται με το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι SA, SB, KKP και KVTO.

Ρεύμα ιονισμού πρόσπτωσης (impact ionization current)

Μέχρι τώρα αναφέραμε μόνο το ρεύμα του καναλιού του τρανζίστορ. Επίσης έχουν αναφερθεί οι παρασιτικές δομές διόδων ανάμεσα από τους ακροδέκτες source και drain και το υπόστρωμα. Σε αυτά τα ρεύματα έρχεται να προστεθεί άλλη μια παρασιτική συνιστώσα που εμφανίζεται σαν ένα ρεύμα από τον ακροδέκτη drain προς το υπόστρωμα. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα ιονισμού.

Οι φορείς ρεύματος καθώς επιταχύνονται από τη διαφορά τάσης στα άκρα του καναλιού, μεγιστοποιούν την ταχύτητά τους στο άκρο του drain. Η ταχύτητά τους είναι δυνατόν να προκαλέσει τον ιονισμό της περιοχής πλησίον του ακροδέκτη του drain και τη δημιουργία ελεύθερων φορέων ρεύματος. Ένα μέρος αυτών των φορέων θα δημιουργήσει, λόγω και της διαφοράς δυναμικού VDB, ένα ρεύμα (IDB) από τον ακροδέκτη drain προς το υπόστρωμα. Οι παράμετροι που επηρεάζονται από αυτό το φαινόμενο είναι IBA, IBB και IBN.

Ρεύμα πύλης (gate current)

Το υλικό της πύλης είναι ένας μονωτής, έτσι δεν επιτρέπει στο ρεύμα να τον διαπεράσει. Καθώς οι τεχνολογίες οδηγούνται σε όλο και μικρότερες διαστάσεις των διατάξεων, αναλογικά μικραίνει και το πάχος του μονωτή. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει ένα αμελητέο ρεύμα που περνάει μέσα από τον μονωτή της πύλης το οποίο σχετίζεται με το φαινόμενο σήραγγα (tunneling effect) που παρατηρείται εντονότερο καθώς λεπταίνει το υλικό του μονωτή. Επίσης υπάρχει ένα άλλο ρεύμα που περνάει μέσω της περιοχής του μονωτή της πύλης και των ενεργών περιοχών source και drain το οποίο ονομάζεται ρεύμα επικάλυψης πύλης.

Οι παράμετροι που επηρεάζονται από το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι XB, EB, KG και LOVING.

2.3.5 Θόρυβος (noise)

Ο θόρυβος αποτελεί μια σημαντικότερη παράμετρο στην λειτουργία και την συμπεριφορά των κυκλωμάτων. Η ορθή πρόβλεψη της τιμής του και η ποιοτική του εξάρτηση από τα διάφορα φαινόμενα είναι μια διαδικασία ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Ο θόρυβος που εμφανίζεται σε ένα MOSFET μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στον θερμικό θόρυβο που εμφανίζεται στο κανάλι. Η τιμή του θορύβου αυτού είναι ίδια για κάθε συχνότητα και επηρεάζεται από διάφορα φαινόμενα. Ειδικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν διάφορα φαινόμενα κοντού καναλιού με αλληλοακυρόμενες επιδράσεις. Επίσης στο κανάλι εμφανίζεται και ένας χαμηλόσυχνος θόρυβος που ονομάζεται flicker noise, ειδικά σε υψίσυχνες αναλύσεις παίζει ο θόρυβος που μεταφέρεται στην πύλη (induced gate noise) λόγω μη στατικών φαινομένων. Επίσης ονομαστική αναφορά θα κάνουμε στο θόρυβο βολής που εμφανίζεται στην πύλη. Εκτός του εσωτερικού τμήματος του MOSFET εμφανίζεται θερμικός θόρυβος και στις διάφορες εξωτερικές αντιστάσεις.

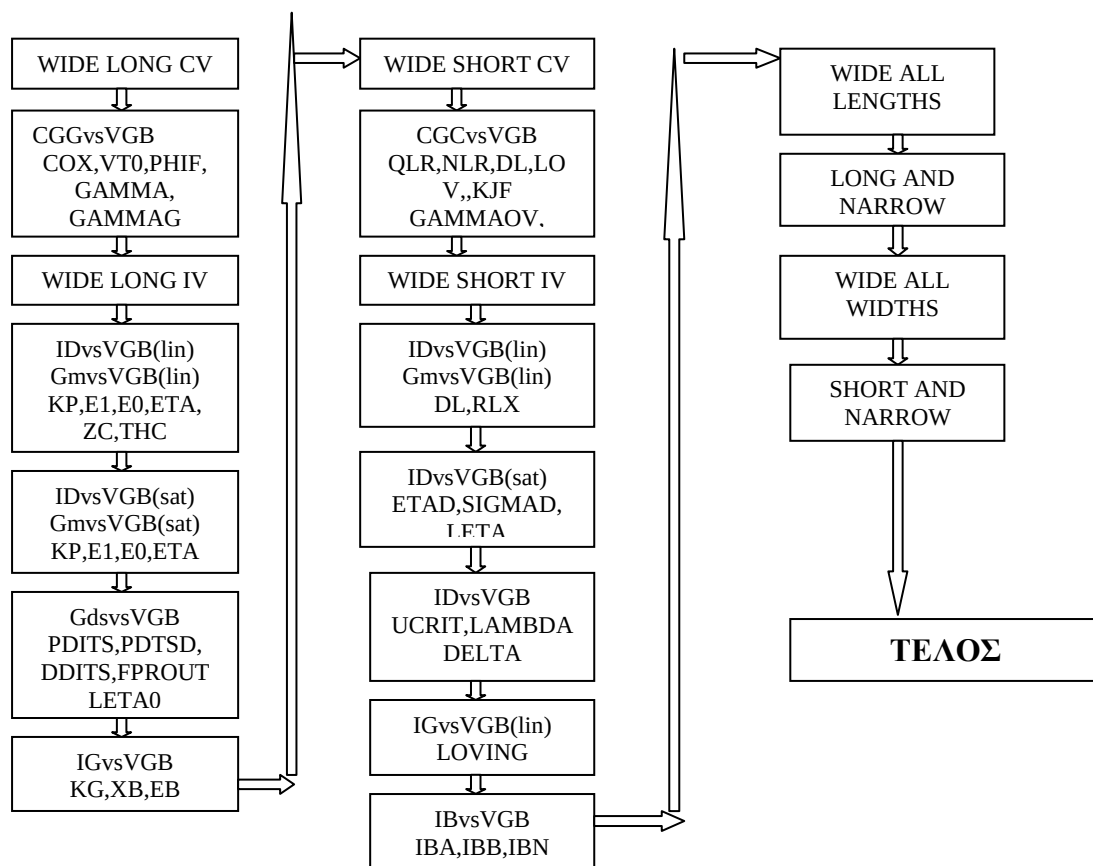
Κεφάλαιο 3

3. Εξαγωγή παραμέτρων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε όλη τη διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων “BSIM4 το EKV3”, έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή προσέγγιση για τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στο EKV3 μοντέλο.

3.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων

Όλη η διαδικασία που ακολουθήσαμε βασίζεται στη λεπτομερή μεθοδολογία εξαγωγής παραμέτρων που αναπτύχθηκε από τους A. Bazigos, M.Bucher[10]. Παρακάτω παραθέτουμε με μορφή διαγράμματος ροής, όλα τα βήματα που ακολουθήσαμε για να εξαχθούν οι σωστές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου EKV3.



Ο παραπάνω πίνακας δείχνει λεπτομερώς όλη τη διαδικασία , βήμα-βήμα , που ακολουθήσαμε για να κάνουμε την εξαγωγή των παραμέτρων, κάνοντας χρήση των μετρήσεων του μοντέλου. Η διαδικασία δεν είναι τόσο απλή όσο φαίνεται , καθώς κάθε φορά που εξάγουμε μια παράμετρο , πρέπει να γυρίζουμε από την αρχή σε κάθε προηγούμενη παράμετρο που εξάγαμε, αφού η τιμή μιας παραμέτρου είναι πολύ πιθανό να εξαρτάται από την τιμή άλλων παραμέτρων που ακολουθούν και η τιμή τους προκύπτει αργότερα. Ο στόχος μας λοιπόν κάθε φορά είναι να αλλάζουμε την τιμή κάθε παραμέτρου , με σκοπό να καταλήξουμε στην επικρατέστερη, έτσι ώστε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης να προσεγγίζει κάθε φορά τις γραφικές παραστάσεις που δημιουργούνται από τις μετρήσεις που έχουν γίνει. Όταν λοιπόν ύστερα από πολλές προσπάθειες βρούμε την επικρατέστερη τιμή θα μπορούμε πολύ εύκολα να διακρίνουμε ότι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης προσεγγίζει τη γραφική παράσταση (όπου «αναφέρεται» κάθε παράμετρος), που δημιουργείται με τις μετρήσεις που ήδη έχουμε. Έτσι λοιπόν η διαδικασία αυτή είναι πολύ χρονοβόρος μέχρι να καταλήξουμε στις σωστές τιμές και γενικότερα για να ολοκληρώσουμε την εξαγωγή παραμέτρων.

Παρακάτω θα αναλύσουμε με λίγα λόγια το διάγραμμα ροής της προηγούμενης σελίδας:

Ανάλυση:

- Για την εξαγωγή των τιμών παραμέτρων COX, VTO, GAMMA, PHI, GAMMAG χρησιμοποιούμε τις CV μετρήσεις των wide και long γεωμετριών.
- Για να βελτιώσουμε τις τιμές των παραμέτρων VTO, GAMMA κάνουμε χρήση της γραφικής παράστασης ID vs VG.
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων KP, E0, E1, ETA κάνουμε χρήση της γραφικής παράστασης της διαγωγιμότητας gm vs Vg σε linear mode
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων ZC, THC κάνουμε χρήση της γραφικής παράστασης της διαγωγιμότητας gm vs Vg σε saturation mode
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων DL, RLX, ETAD, LETA, UCRIT, LAMBDA χρησιμοποιούμε τις μετρήσεις του wide short μοντέλου και κάνοντας χρήση των γραφικών παραστάσεων gm vs Vg σε linear mode , Id vs Vg σε linear mode, Id vs Vg σε saturation mode , Vp vs Vg , Id vs Vd , gds vs Vd σε strong και σε weak inversion

- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων LR, QLR, NLR και κατά συνέπεια και βελτίωση των LETA, ETAD κοιτάμε όλες τις γεωμετρίες με διάφορες τιμές του L και μεγάλου W (wide/long , wide/short)
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων LOV, GAMMAOV , DLC χρησιμοποιούμε τις wide/short CV μετρήσεις
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων DW, WETA, WE0, WE1 χρησιμοποιούμε τις μετρήσεις σε narrow/long
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων WR , QWR , NWR κάνουμε χρήση όλων των widths/long
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων WDL , WUCRIT , WRLX , WLAMBDA κάνουμε χρήση όλων των narrow/short
- Για την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων WLR , WQLR , WNLR κάνουμε χρήση όλων των width/short

Από τα παραπάνω βλέπουμε πως η διαδικασία είναι η ίδια για όλες τις παραμέτρους επιλέγοντας κάθε φορά διαφορετικές μετρήσεις και διαφορετική γεωμετρία.

Για να καταλήξουμε στις σωστές τιμές των παραμέτρων πέραν από την πάνω διαδικασία που περιγράψαμε , πρέπει να κάνουμε και μια σειρά βελτιστοποιήσεων (optimizations), η εκτέλεση των οποίων μας δίνουν μια εκτίμηση για τις τιμές των βασικών παραμέτρων του EKV3 μοντέλου.

Όμως κάθε φορά θα πρέπει να καθορίζουμε τις παραμέτρους και την γεωμετρία που εκτελούνται οι βελτιστοποιήσεις αυτές. Επίσης επιλέγουμε αν θα βελτιστοποιήσουμε ως προς το σχετικό ή το απόλυτο λάθος, ένα κριτήριο που βασίζεται ως προς το σε ποια περιοχή αναστροφής επιθυμούμε να ρίξουμε το βάρος μας. Αν επιθυμούμε καλύτερα αποτελέσματα στην ασθενή αναστροφή , επιλέγουμε relative errors , ενώ αν ενδιαφερόμαστε για την ισχυρή αναστροφή επιλέγουμε absolute errors.

Στόχος των βελτιστοποιήσεων είναι να ελαχιστοποιήσουμε το RMS error όσο το δυνατόν περισσότερο, προσεγγίζοντας έτσι καλύτερα τις τιμές των παραμέτρων που βελτιστοποιούμε. Επίσης επειδή μας αφορά περισσότερο η περιοχή κορεσμού από την γραμμική περιοχή του τρανζίστορ , είναι αποδεκτά κάποια trade-offs έτσι ώστε να υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα σ' αυτήν την περιοχή.

Για την απόδοση σωστότερων τιμών κάποιες φορές μια βελτιστοποίηση μπορεί να εκτελεστεί σε περισσότερα από ένα βήματα , ή να εκτελεστούν τα βήματα με η μορφή loop .

3.2 Ανάλυση της διαδικασίας εξαγωγής παραμέτρων

Αξίζει να σημειωθεί για την κατανόηση των γραφικών παραστάσεων που ακολουθούν πως με **ροζ** χρώμα απεικονίζονται οι “μετρήσεις” του BSIM4 μοντέλου ενώ με **μπλέ** χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα του EKV3 μοντέλου.

Ροζ : «μετρήσεις» του BSIM4 μοντέλου

Μπλέ : τα αποτελέσματα του EKV3 μοντέλου

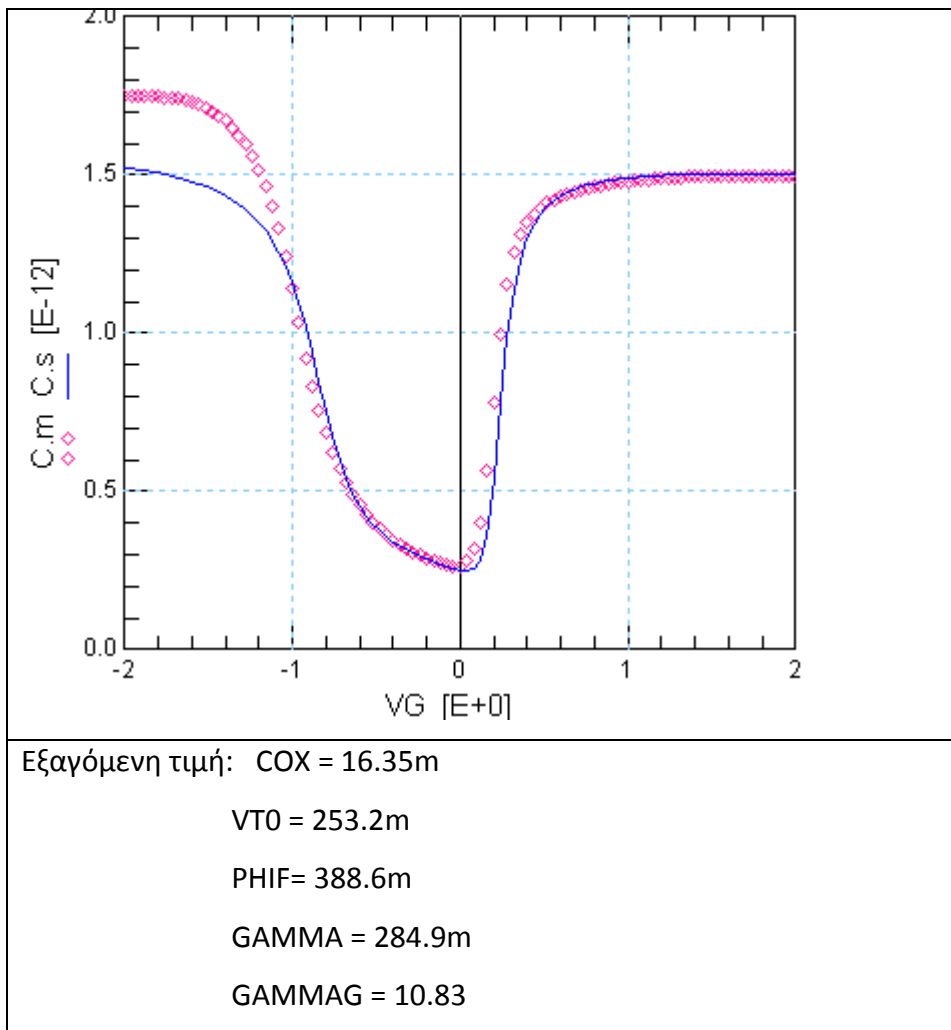
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις για το **NMOS**

3.2.1 Long and Wide Channel Device

Όταν περιγράφουμε long and wide channel devices έχουμε επιλέξει συσκευή με μέγιστο μήκος $L=10\mu$ και μέγιστο πλάτος $W=10\mu$.

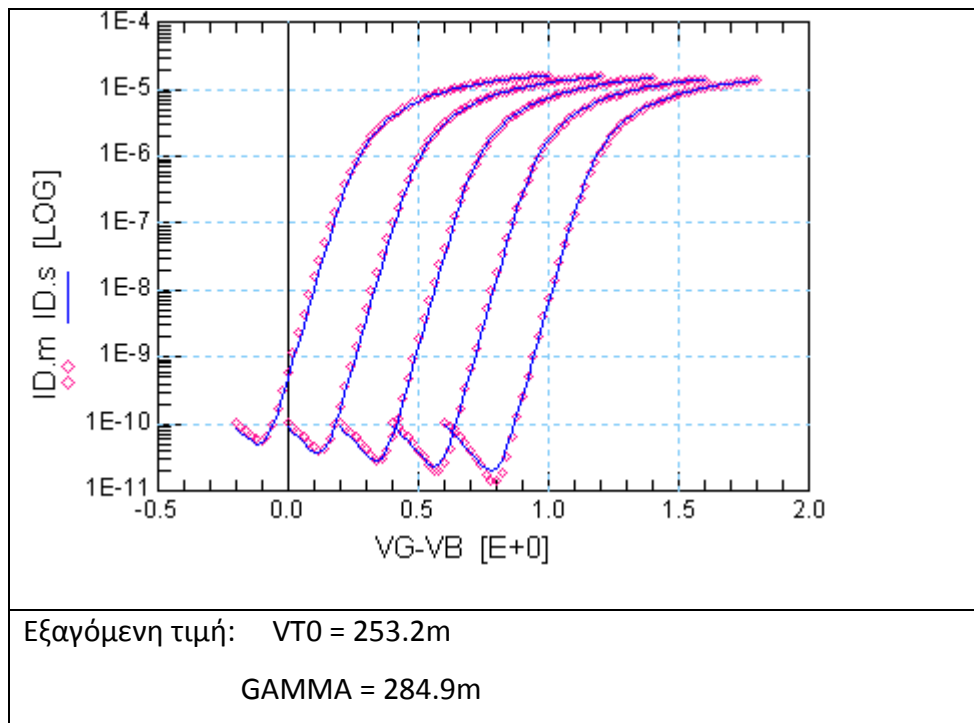
CGG vs.VG analysis

Αρχικά από τη γραφική παράσταση **CGG vs.VG** , ξεκινάει η εξαγωγή παραμέτρων του συστήματός μας. Οι παράμετροι που εξάγουμε είναι οι **COX** , **VTO** , **PHIF** , **GAMMA** , **GAMMAG** .

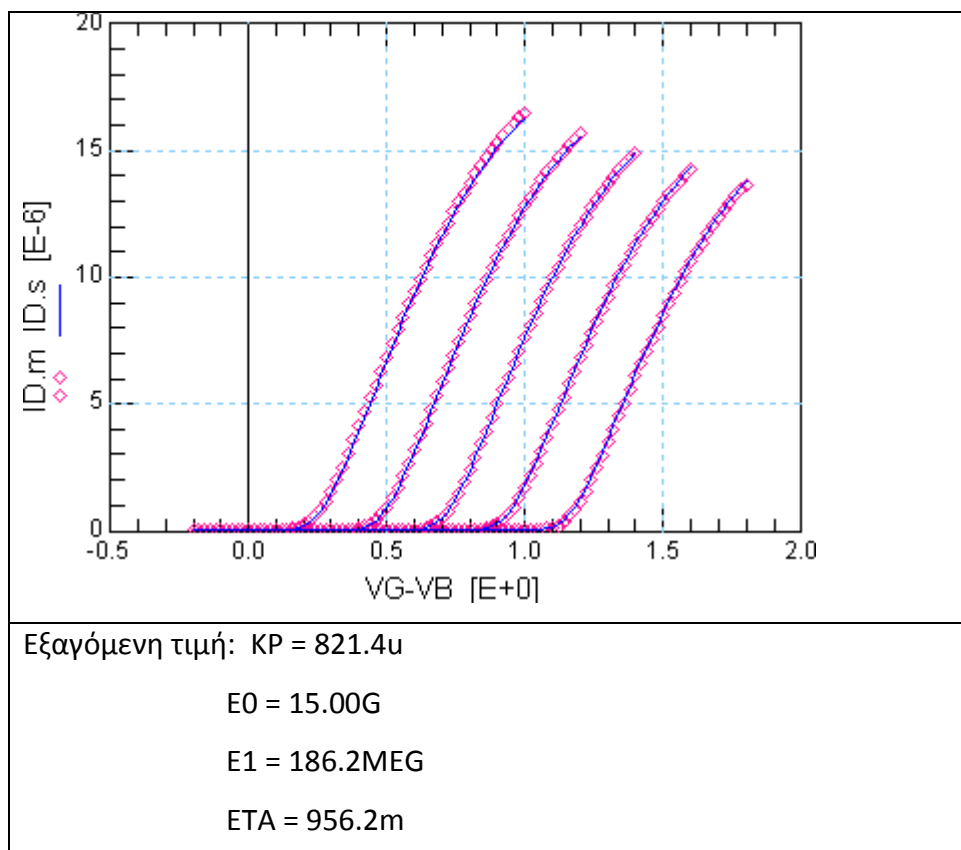


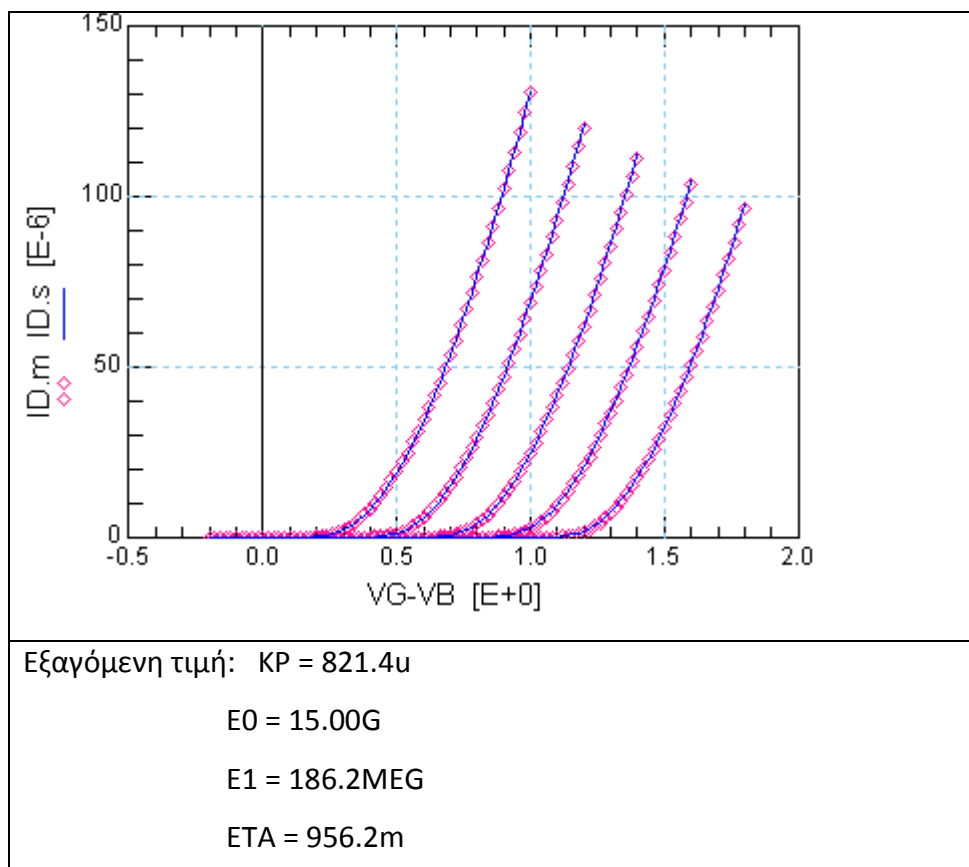
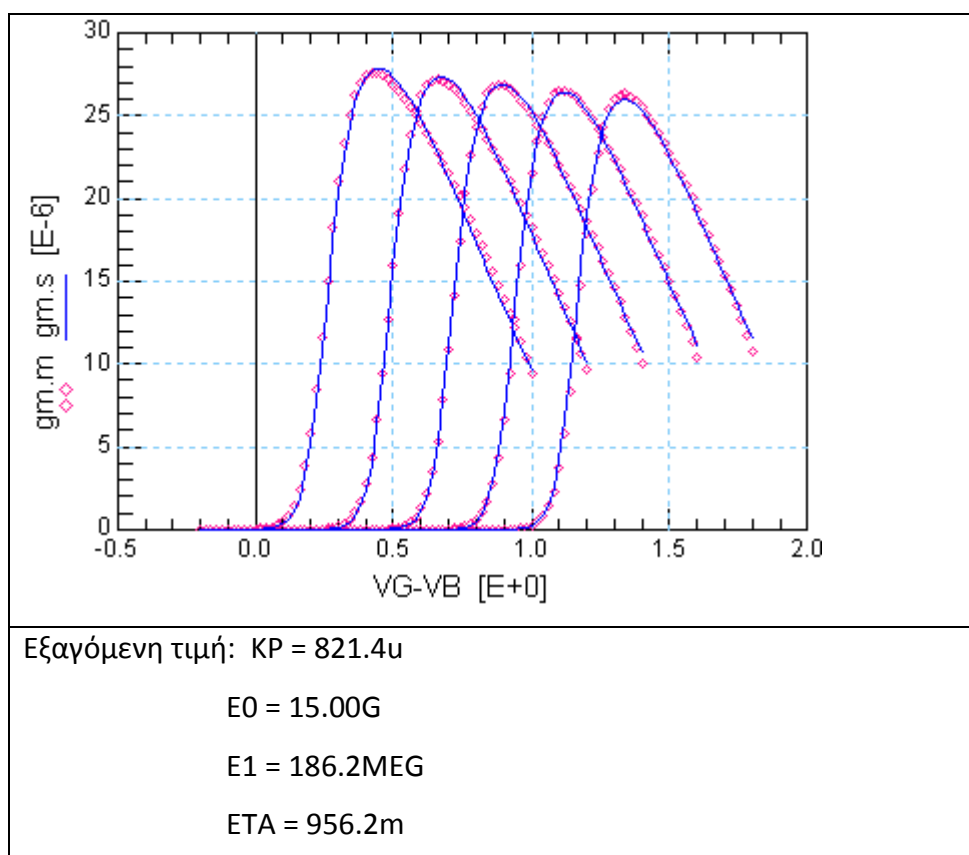
ID , gm vs VG analysis

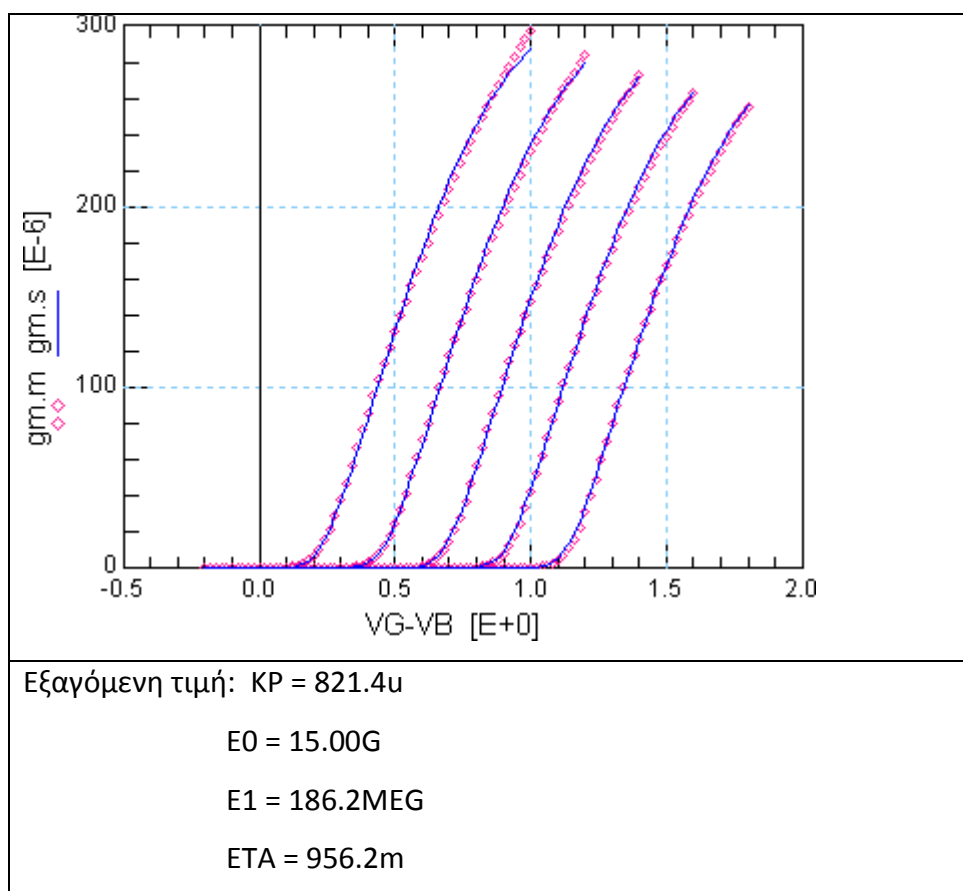
Στη συνέχεια χρησιμοποιούμε την IV ανάλυση. Από το λογάριθμο της γραφικής παράστασης **ID vs VG** στη γραμμική περιοχή και ενώ εστιάζουμε σε αδύναμη αναστροφή , μπορούμε να κάνουμε βελτιστοποίηση των τιμών των παραμέτρων που εξάγαμε πριν , δηλαδή των τιμών **VTO** και **GAMMA**



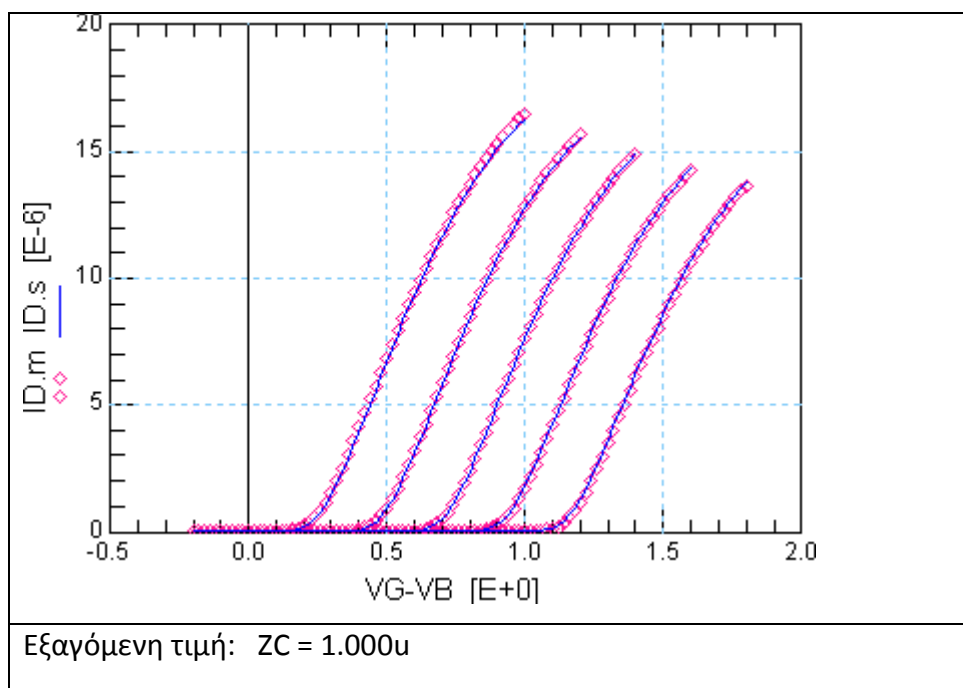
Επίσης από τις γραφικές παραστάσεις **ID vs VG** και **gm vs VG** σε ισχυρή αναστροφή τόσο σε γραμμική περιοχή όσο και σε περιοχή κορεσμού , μπορούμε να εξάγουμε τις παραμέτρους **KP** , **E0** , **E1** και **ETA**.







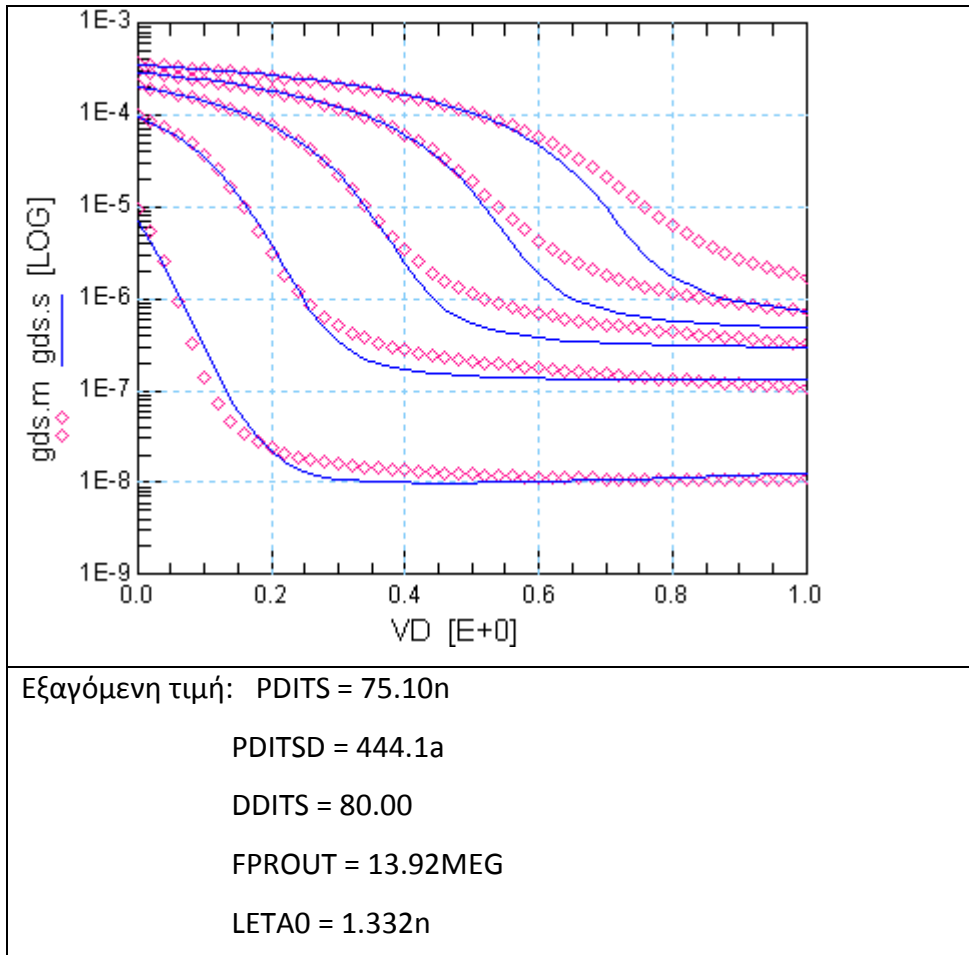
Επίσης από τη γραφική παράσταση **ID vs VG** σε γραμμική περιοχή μπορούμε να εξαγάγουμε τις παραμέτρους **ZC** και **THC**.



THC = 0.000

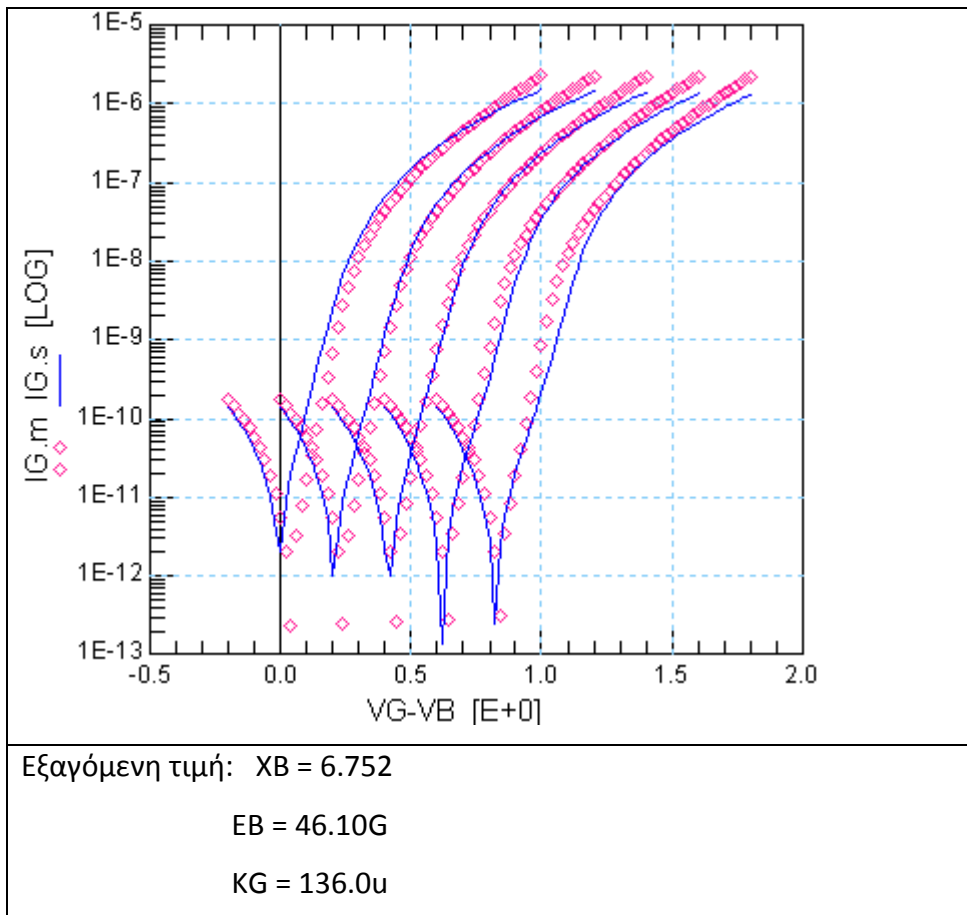
ID , gds vs VG analysis

Στη συνέχεια από τη γραφική παράσταση **gds vs VG** εξάγουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με το rocket implants, που είναι **PDITS** , **PDITSD** , **DDITS** , **FPROUT** και **LETA0**.



IG vs VG analysis

Από τη γραφική παράσταση **IG vs VG** εξάγουμε τις παραμέτρους που έχουν να κάνουν με το gate current και είναι οι **XB** , **EB** και **KG**.

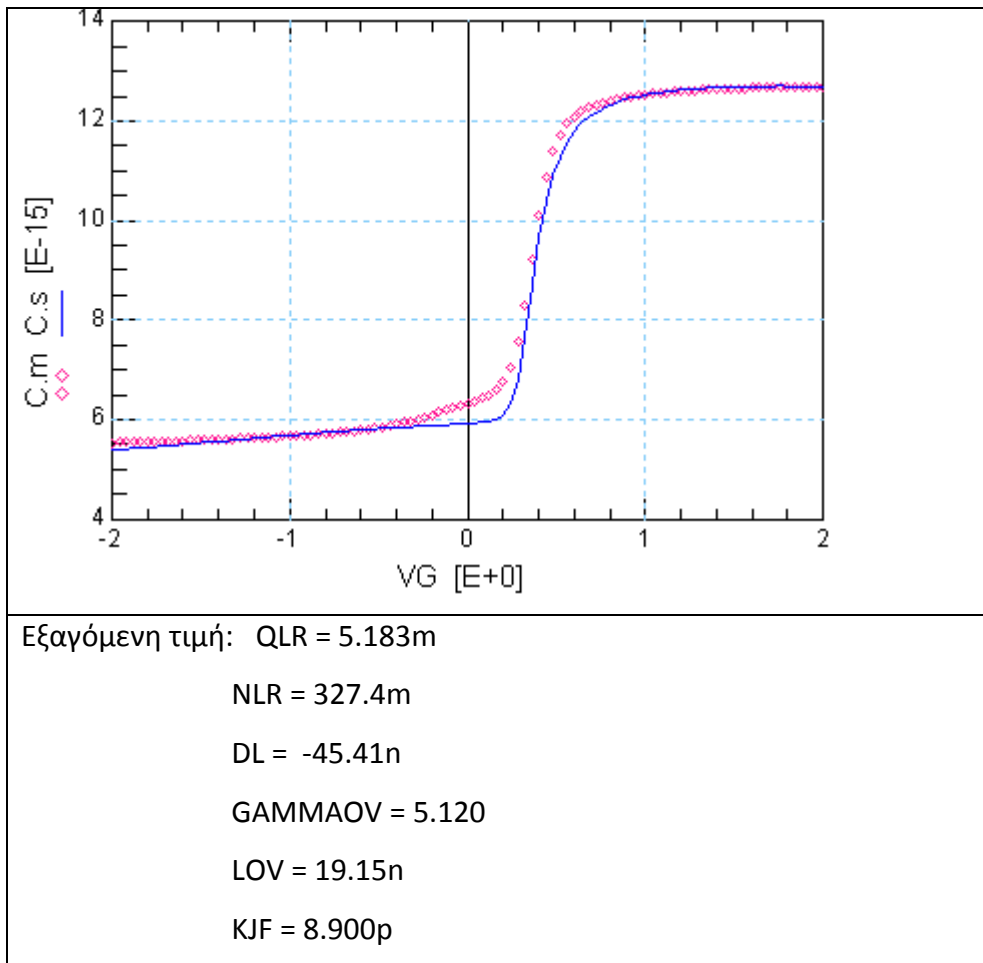


3.2.2 Short and Wide Channel Device

Μετά την εξαγωγή των παραμέτρων που σχετίζονται με το long and wide device , θα εξάγουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με το short and wide device. Σ' αυτήν την περίπτωση έχουμε επιλέξει συσκευή με ελάχιστο μήκος $L=100n$ και μέγιστο πλάτος $W=10u$.

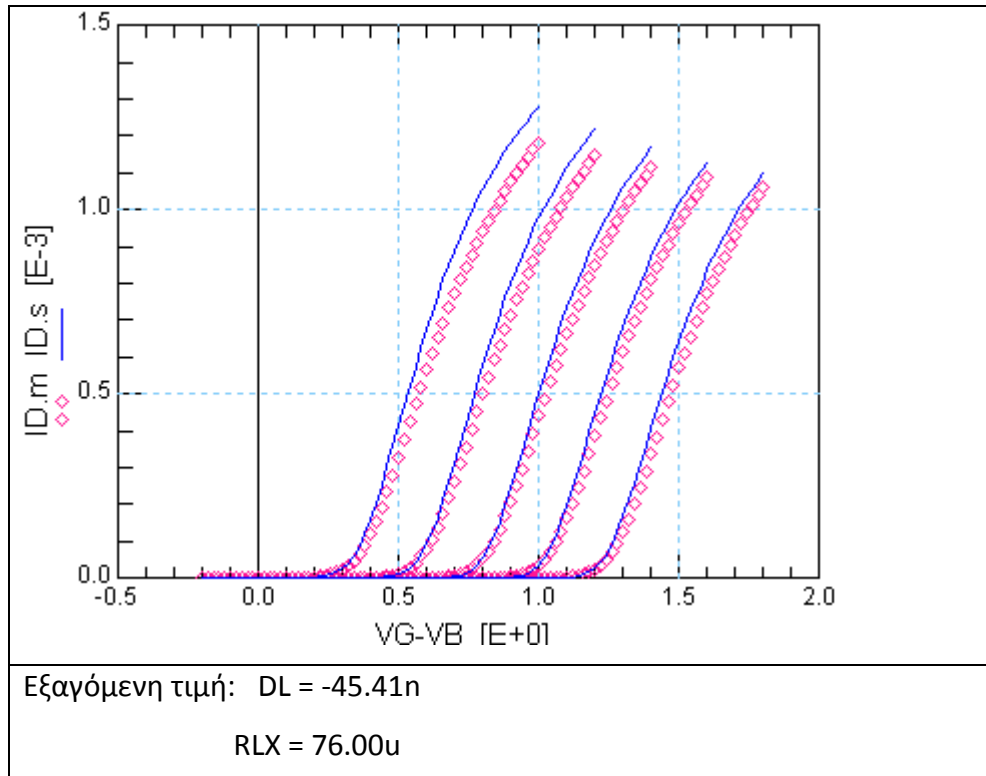
CGC vs.VG analysis

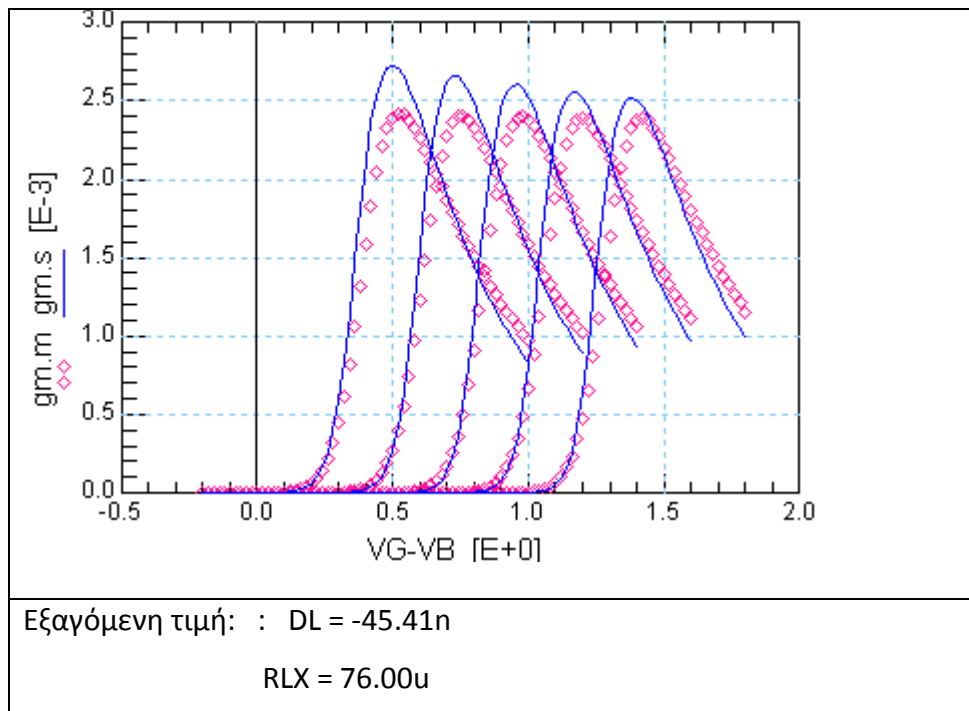
Από τη γραφική παράσταση **CGC vs.VG** εξάγουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με το φαινόμενο reverse short channel (RSCE) που είναι οι **QLR** , **NLR** ,**LR**. Επίσης εξάγουμε τις παραμέτρους **DL** , **GAMMAOV** , **LOV** και **KJF**.



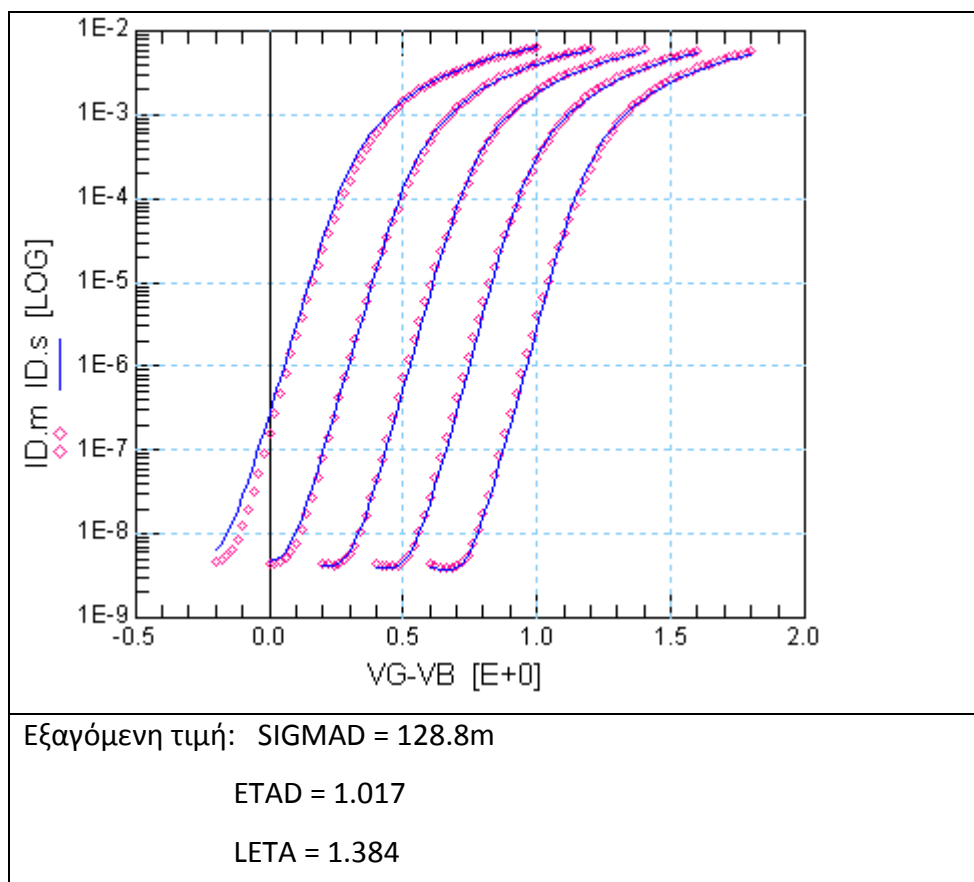
ID vs VG analysis

Στη συνέχεια από τις γραφικές παραστάσεις **ID vs VG** και **gm vs VG** στη γραμμική περιοχή εξάγουμε τις παραμέτρους **RLX** ενώ μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την τιμή της παραμέτρου **DL** που εξάγαμε προηγουμένως.



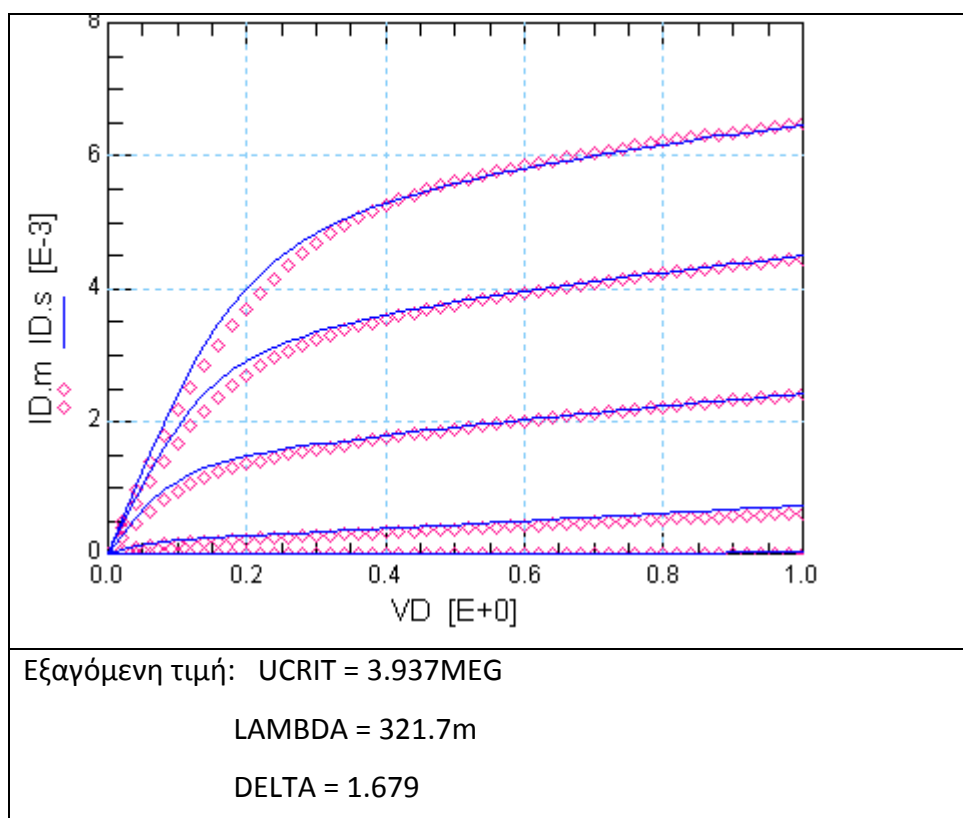


Επίσης από τις ίδιες γραφικές παραστάσεις στην περιοχή κορεσμού όμως εξάγουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με το φαινόμενο drain induced barrier lowering (DIBL) και το DITS. Οι παράμετροι είναι **SIGMAD** , **ETAD** και **LETA**.



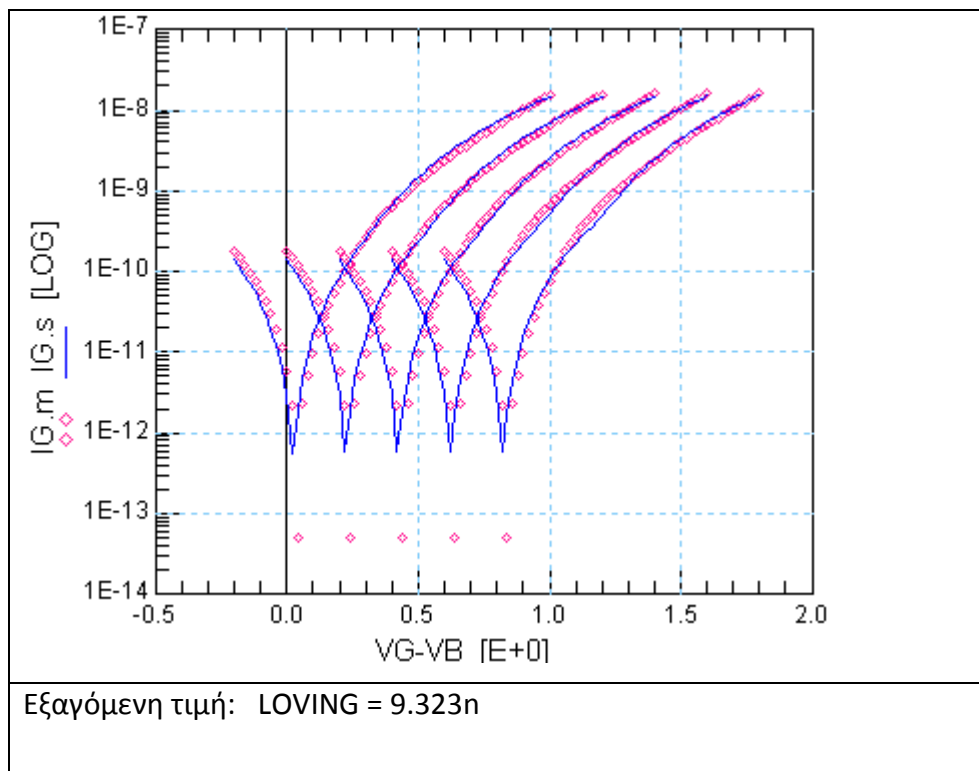
ID vs VD analysis

Στη συνέχεια από τη γραφική παράσταση **ID vs VD** και σε περιοχή κορεσμού εξάγουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με το φαινόμενο velocity saturation. Οι παράμετροι που εξάγουμε είναι οι **UCRIT** , **LAMBDA** και **DELTA**.



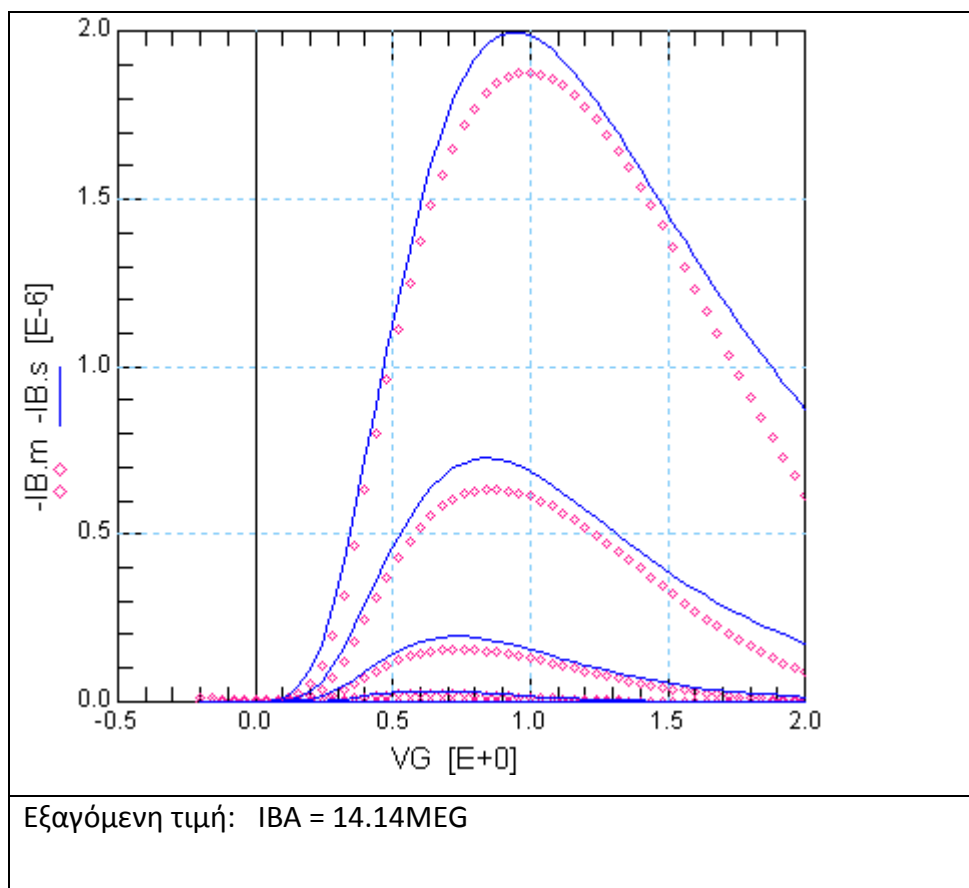
IG vs VG analysis

Από τη γραφική παράσταση **IG vs VG** και σε γραμμική περιοχή εξάγουμε την παράμετρο **LOVING**.



IB vs VG analysis

Στη συνέχεια από τη γραφική παράσταση **IB vs VG** εξάγουμε τις παραμέτρους **IBA** , **IBB** και **IBN** που σχετίζονται με το φαινόμενο impact ionization current.



IBB = 693.9MEG

IBN = 688.6m

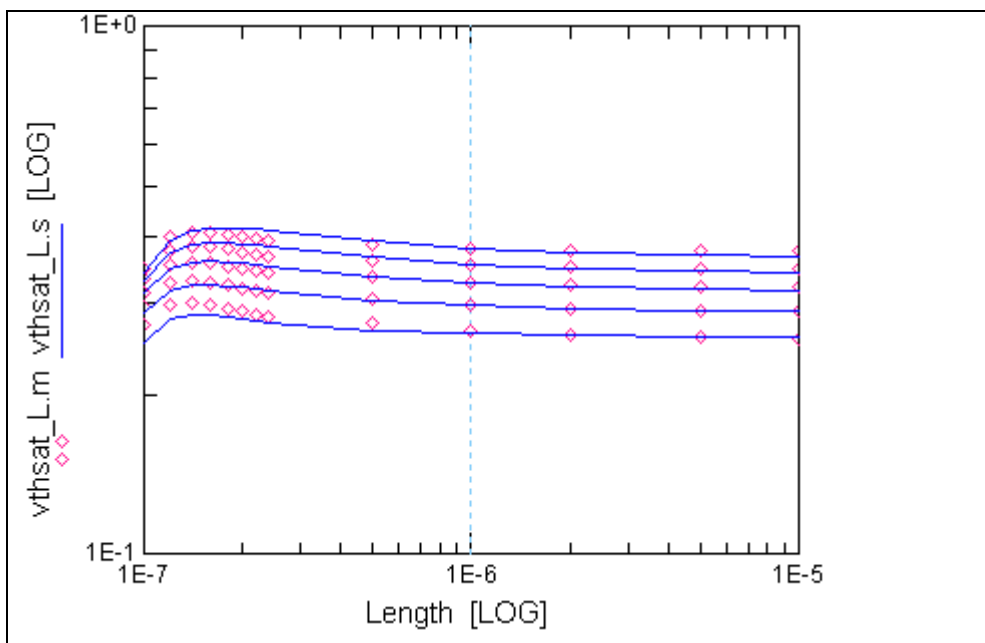
3.2.3 Length Scaling (Wide Channel Device)

Οι παράμετροι που εξάγαμε προηγουμένως , εξήχθησαν από συγκεκριμένες συσκευές και συγκεκριμένης γεωμετρίας. Πολλές από αυτές τις παραμέτρους αντανακλούν ιδιότητες όλης της γεωμετρίας , έτσι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε άλλες γεωμετρίες για την εξαγωγή τους.

Όταν όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με το short-wide και long-wide device , συσκευές με μήκος καναλιού ανάμεσα στις τιμές των παραπάνω , πρέπει να εξεταστούν. Έτσι συνεχίζουμε τη διαδικασία με το length scaling για wide channel devices.

ID vs VG analysis

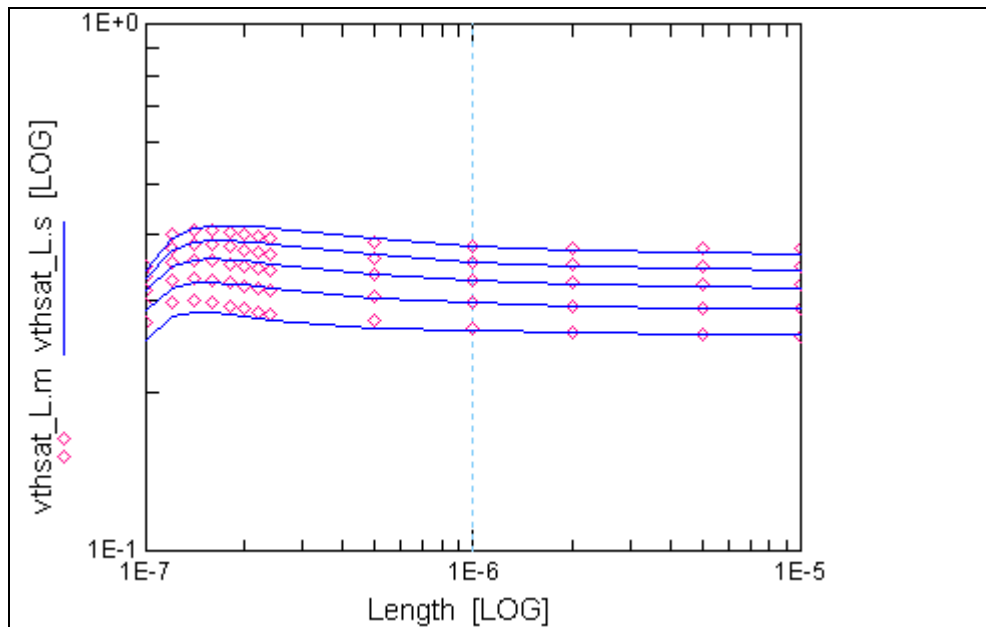
Από τη γραφική παράσταση **ID vs VG** σε γραμμική περιοχή και περιοχή κορεσμού εξάγουμε τις τελικές τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο short channel για διάφορες τιμές του VSB και τα διάφορα μήκη καναλιού της συσκευής. Οι παράμετροι είναι **QLR** , **NLR** και **LR**.



Εξαγόμενη τιμή: $QLR = 5.183m$

$NLR = 327.4m$

$LR = 15.09n$

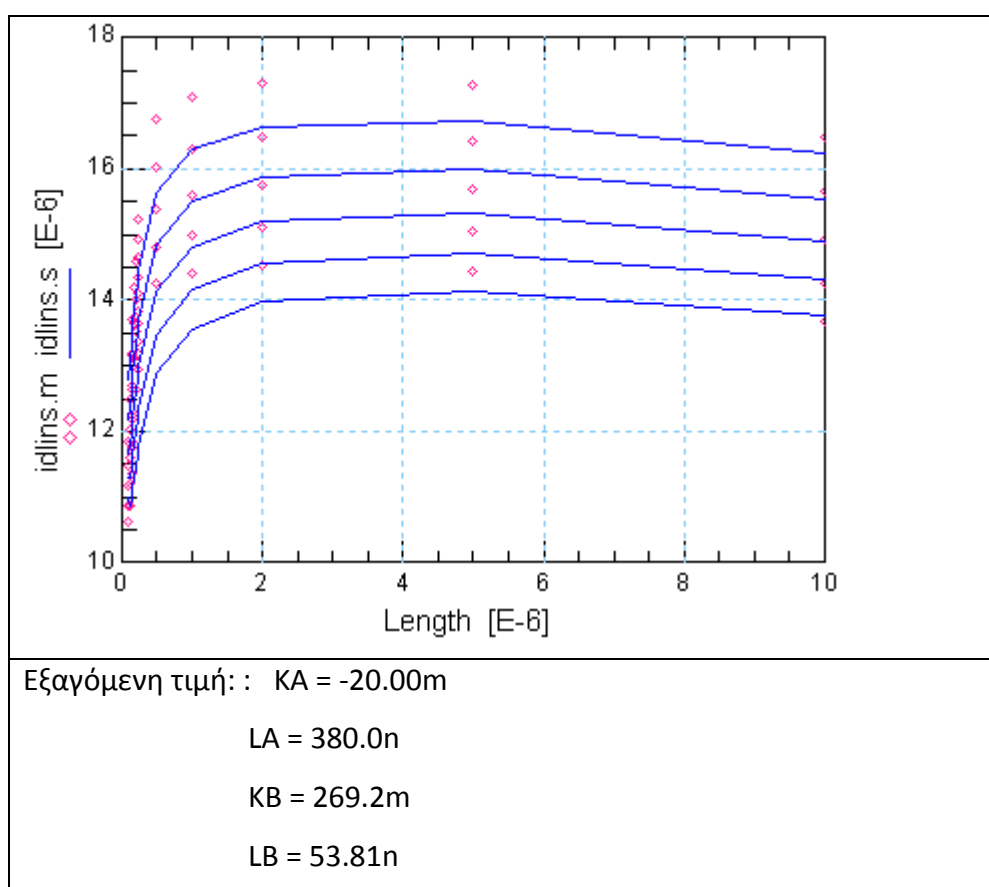
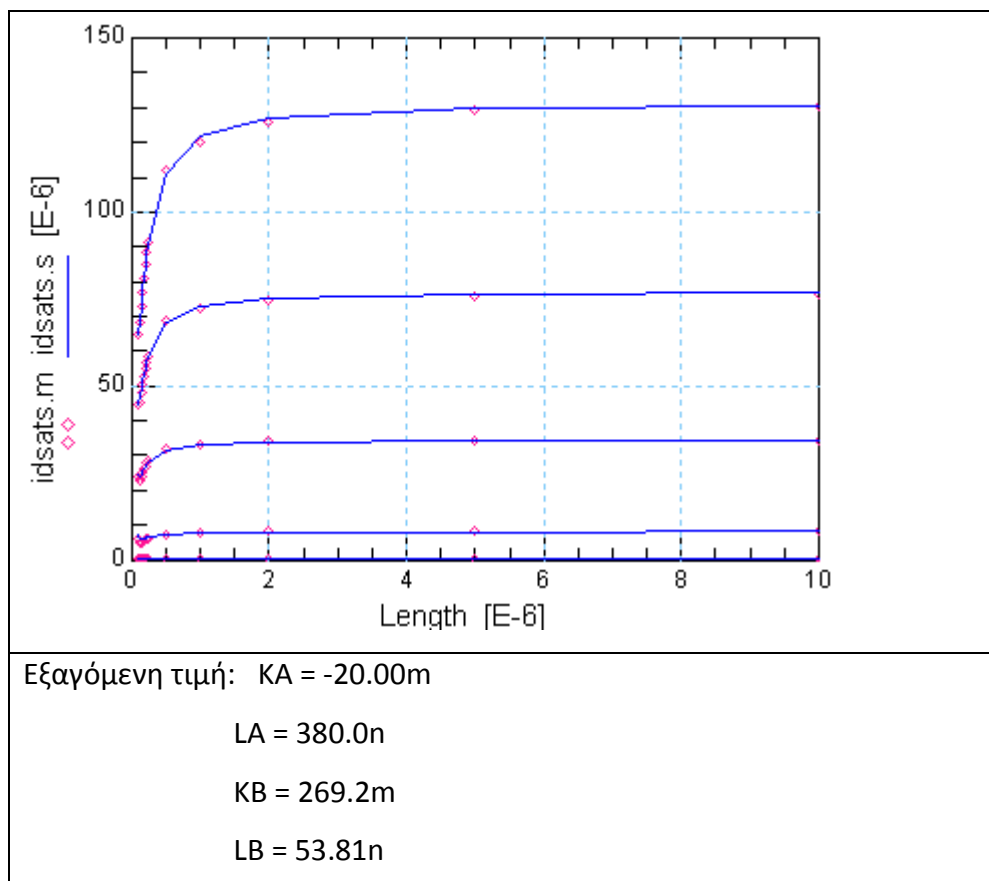


Εξαγόμενη τιμή: : $QLR = 5.183m$

$NLR = 327.4m$

$LR = 15.09n$

Επίσης μπορούμε να εξάγουμε από την ίδια γραφική παράσταση σε ισχυρή αναστροφή και σε γραμμική περιοχή όσο και σε περιοχή κορεσμού τις τιμές των παραμέτρων **KA** , **KB** , **LA** και **LB**

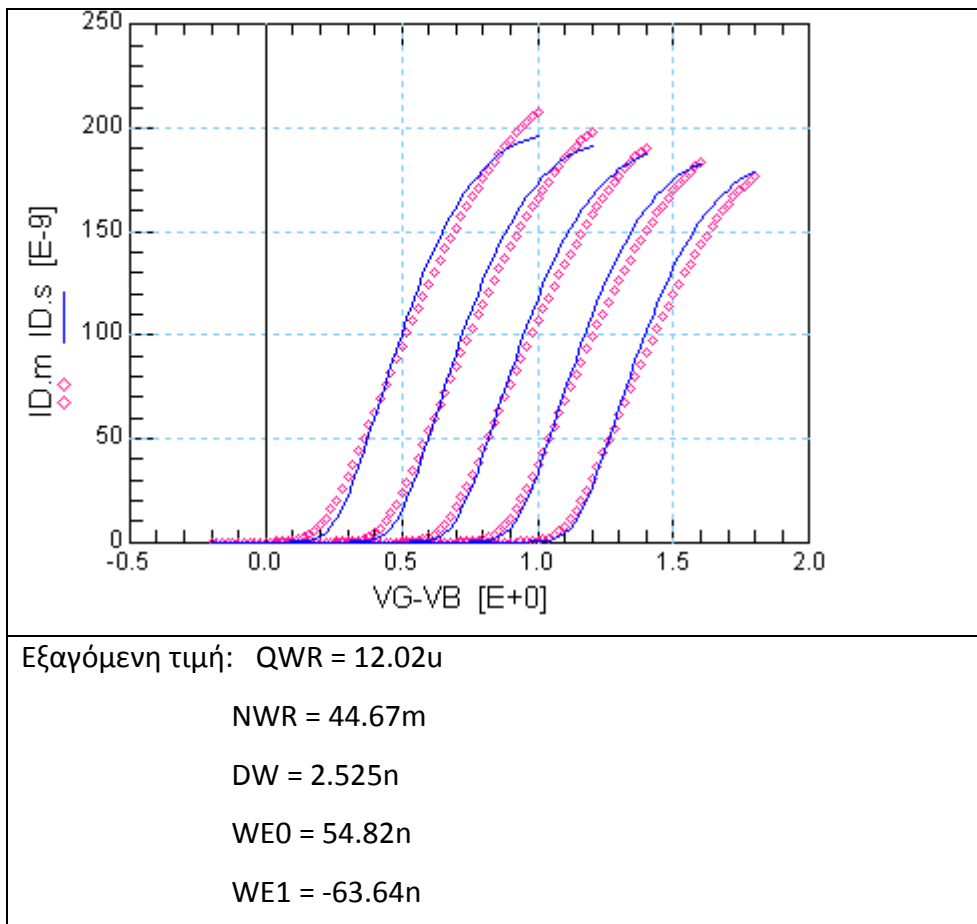


3.2.4 Long and narrow Channel Device

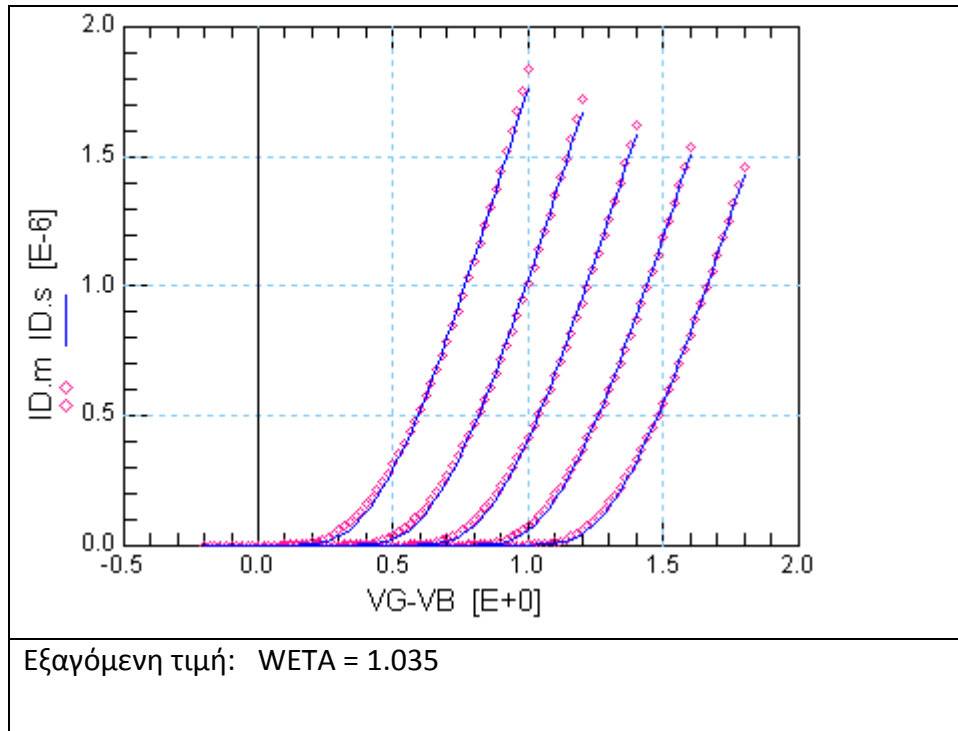
Σ' αυτό το σημείο θα ασχοληθούμε με παραμέτρους που σχετίζονται με φαινόμενα σε στενά και μεγάλα κανάλια συσκευών. Εδώ επιλέξαμε μια συσκευή με μέγιστο μήκος $L=10\mu$ και μικρό πλάτος $W=160n$

ID vs VG analysis

Σ' αυτό το σημείο θα εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων **QWR** , **NWR** , **DW** , **WE0** και **WE1** για τη γραμμική περιοχή.



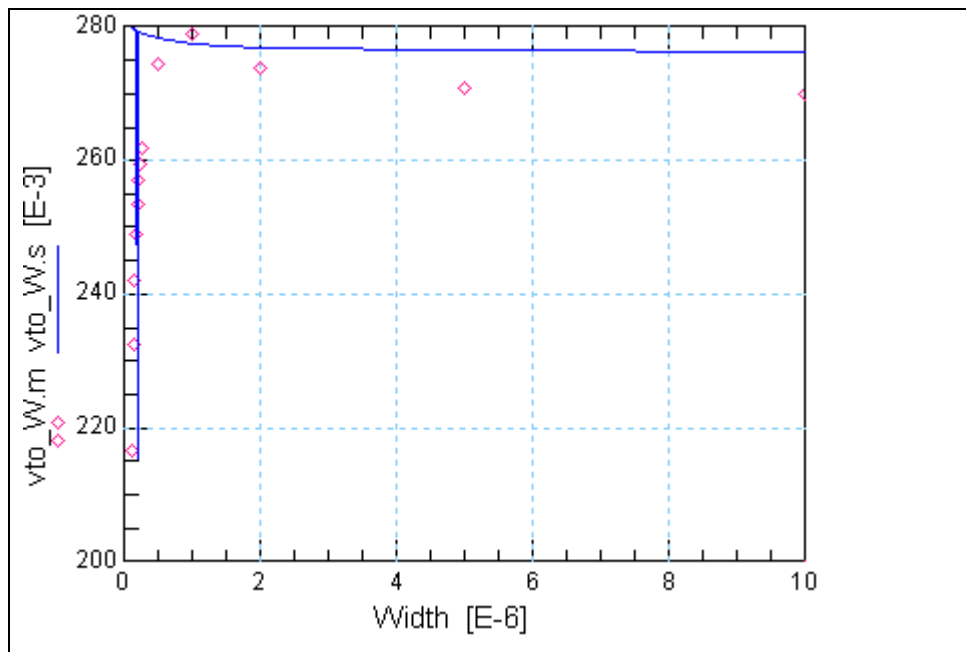
Επίσης την τιμή της παραμέτρου **WETA** στην περιοχή κορεσμού.



3.2.5 Width Scaling (Long Channel Device)

ID vs VG analysis

Σ' αυτό το σημείο εξάγουμε παραμέτρους που σχετίζονται με το φαινόμενο inverse narrow channel και είναι οι **QWR** , **NWR** και **WR**, όπου χρησιμοποιούμε την V_{th} για διαφορά πλάτη.



Εξαγόμενη τιμή: $QWR = 12.02\mu$

$NWR = 44.67m$

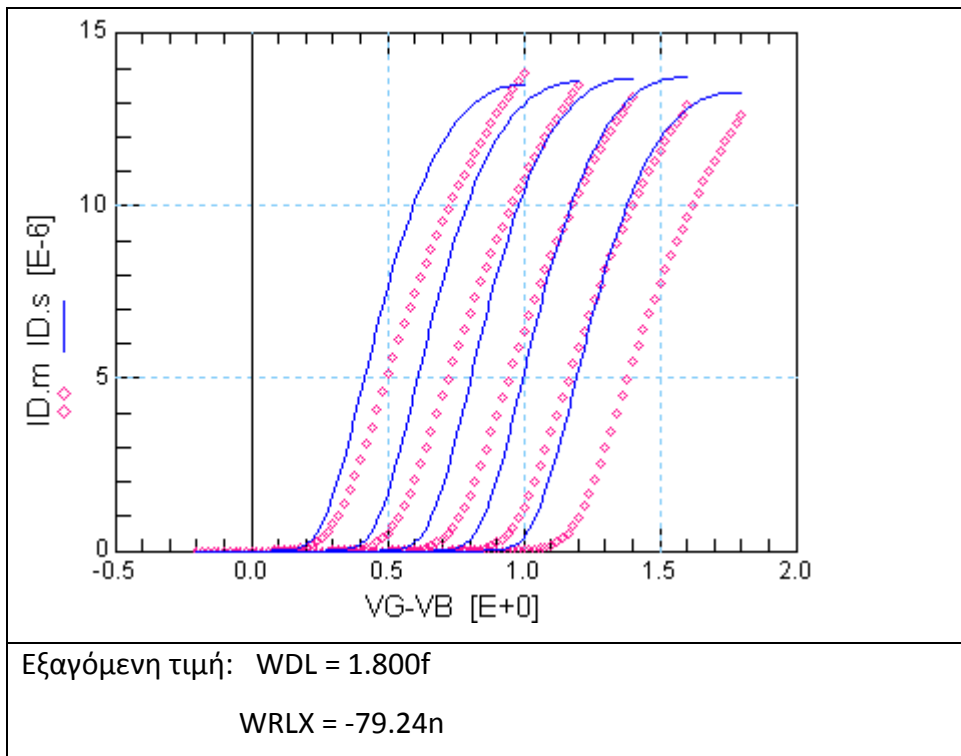
$WR = 106.1n$

3.2.6 Short and narrow Channel Device

Αυτό το βήμα αποτελεί και το τελευταίο σημείο της διαδικασίας μας και εξετάζουμε συσκευές με κανάλια short και narrow. Εδώ επιλέξαμε συσκευή με ελάχιστο μήκος $L=100n$ ελάχιστο πλάτος $W=120n$.

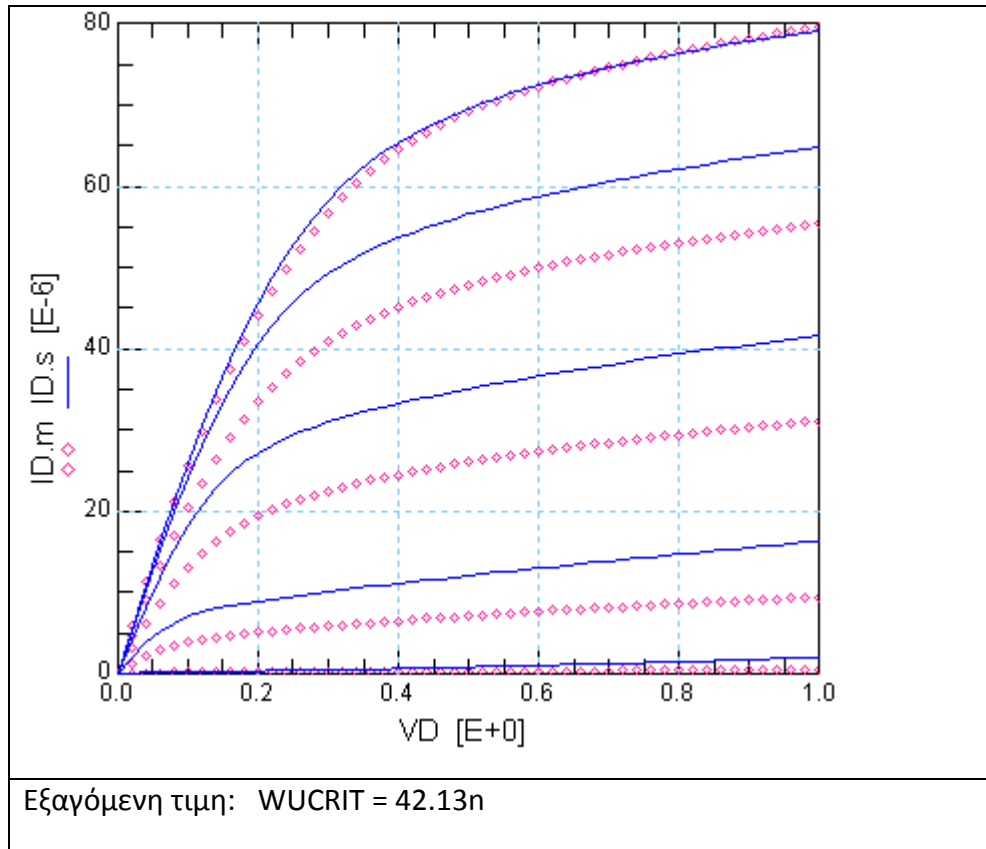
ID vs VG analysis

Από τη γραφική παράσταση **ID vs VG** εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων **WDL** και **WRLX** σε γραμμική περιοχή.



ID vs VD analysis

Από τη γραφική παράσταση **ID vs VD** εξάγουμε την παράμετρο **WUCRIT**.



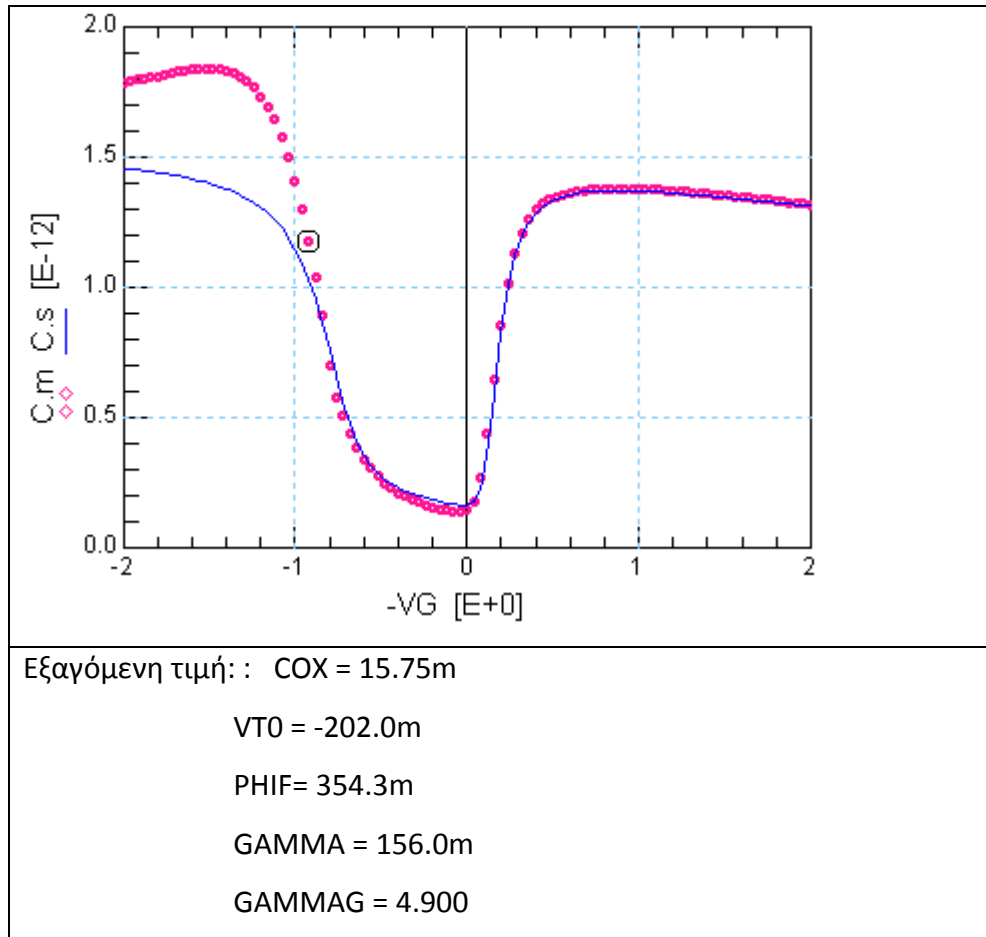
3.3 PMOS

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο προκύπτουν και οι τιμές των παραμέτρων για το **PMOS**. Ακολουθούν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

3.3.1 Long and Wide Channel Device

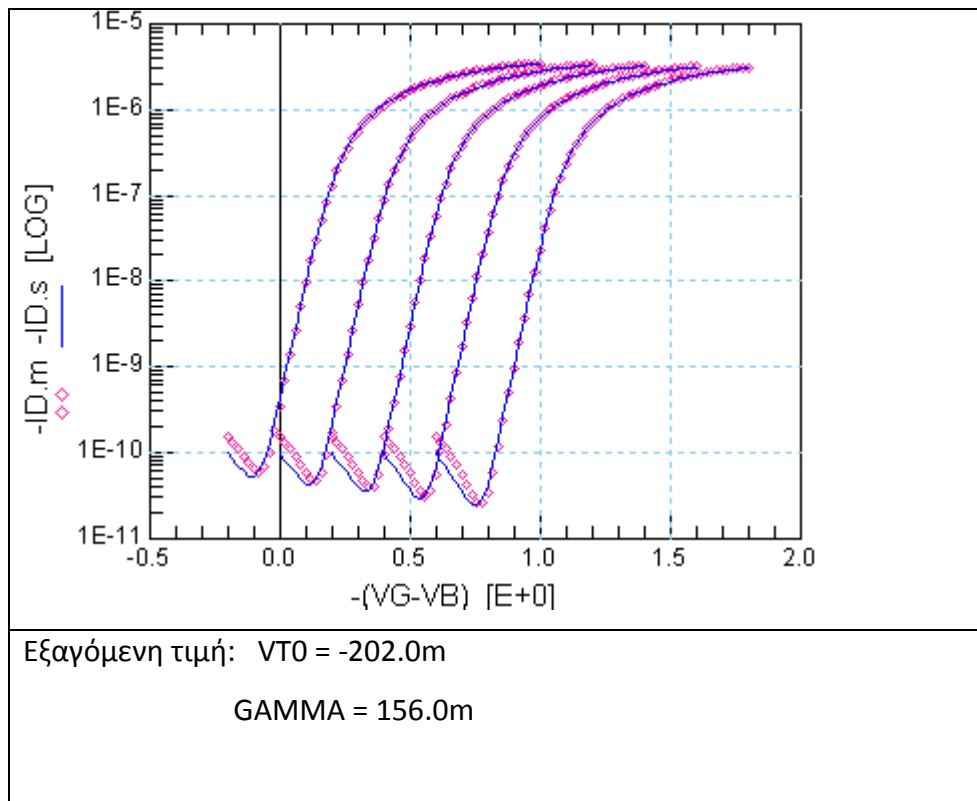
Η συσκευή που επιλέξαμε έχει μέγιστο μήκος $L=10\mu$ και μέγιστο πλάτος $W=10\mu$

CGG vs.VG analysis

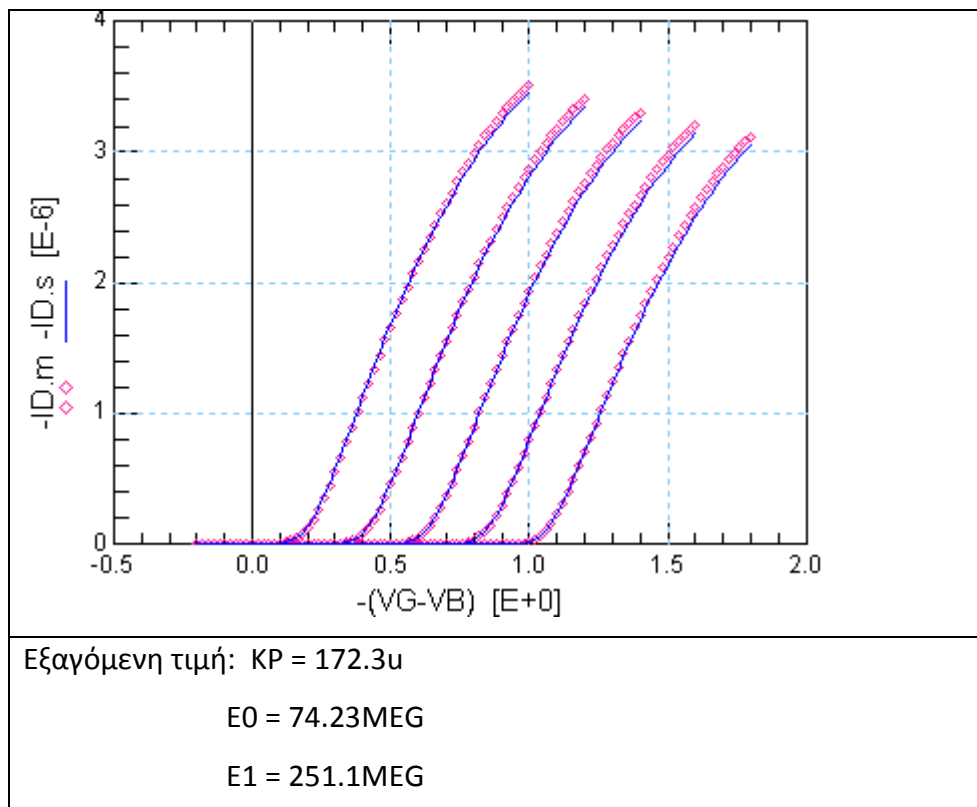


ID , gm vs VG analysis

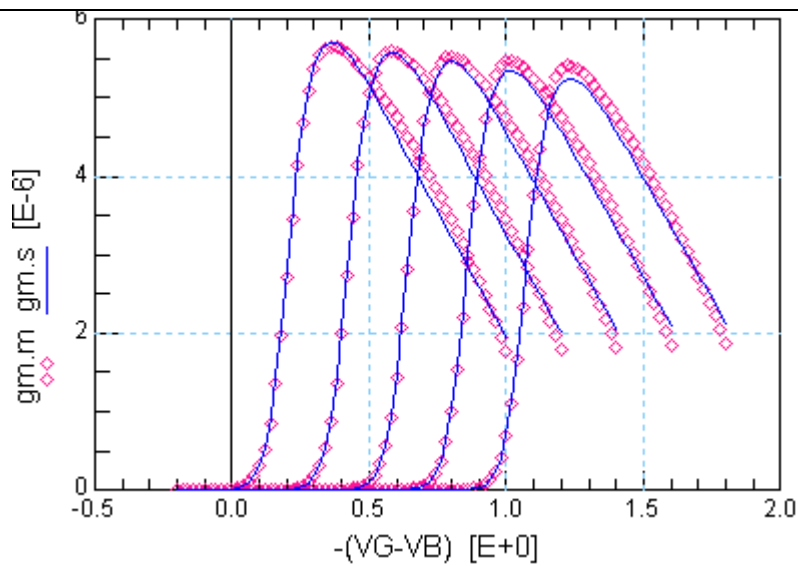
- στη γραμμική περιοχή
- εστιάζουμε σε αδύναμη αναστροφή



- σε γραμμική περιοχή
- εστιάζουμε σε ισχυρή αναστροφή



ETA = 500.0m



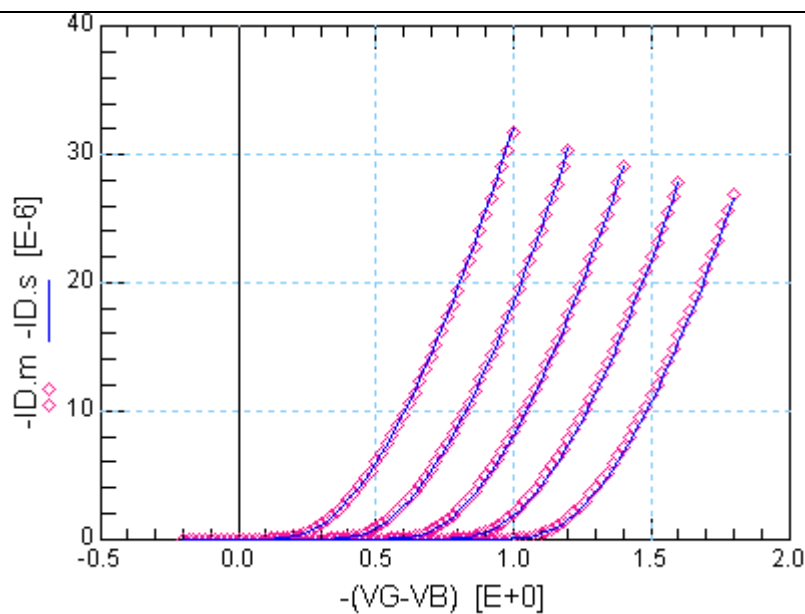
Εξαγόμενη τιμή: KP = 172.3u

E0 = 74.23MEG

E1 = 251.1MEG

ETA = 500.0m

- σε περιοχή κορεσμού
- σε ισχυρή αναστροφή

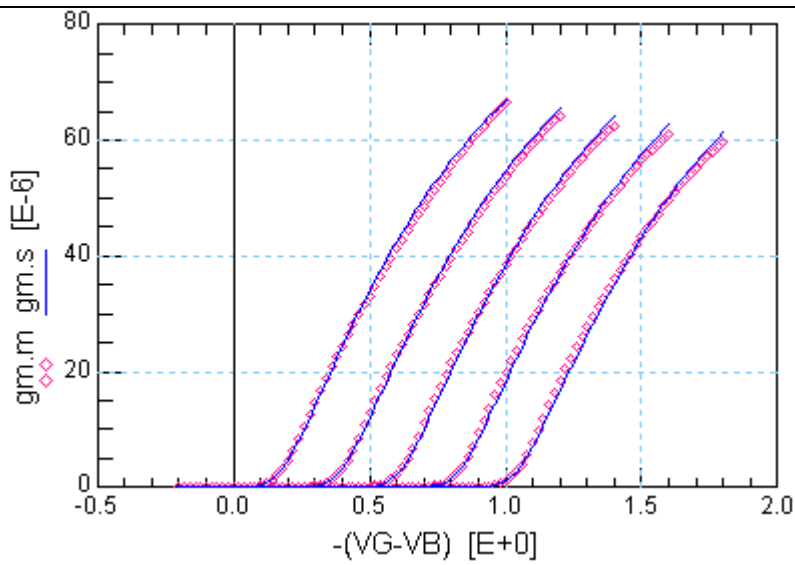


Εξαγόμενη τιμή: KP = 172.3u

E0 = 74.23MEG

E1 = 251.1MEG

ETA = 500.0m



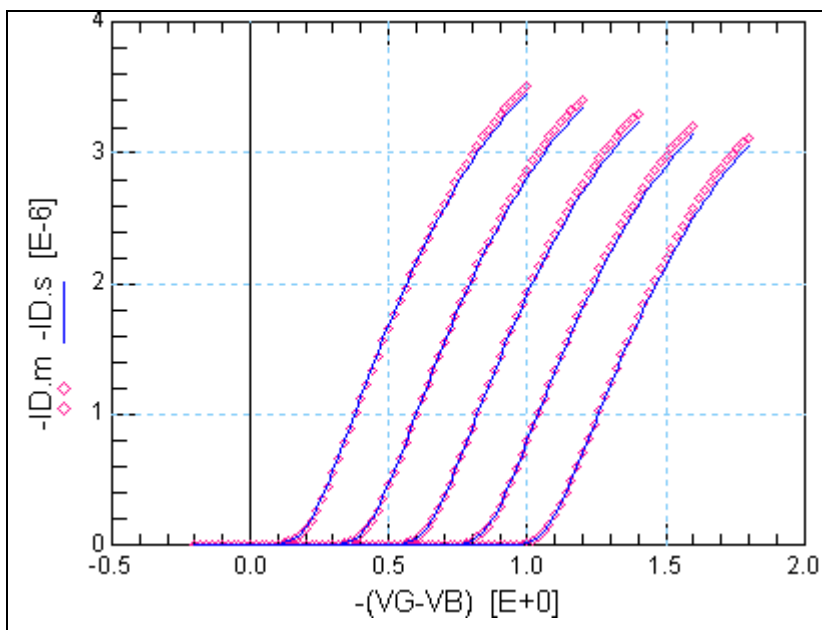
Εξαγόμενη τιμή: KP = 172.3u

E0 = 74.23MEG

E1 = 251.1MEG

ETA = 500.0m

- σε γραμμική περιοχή

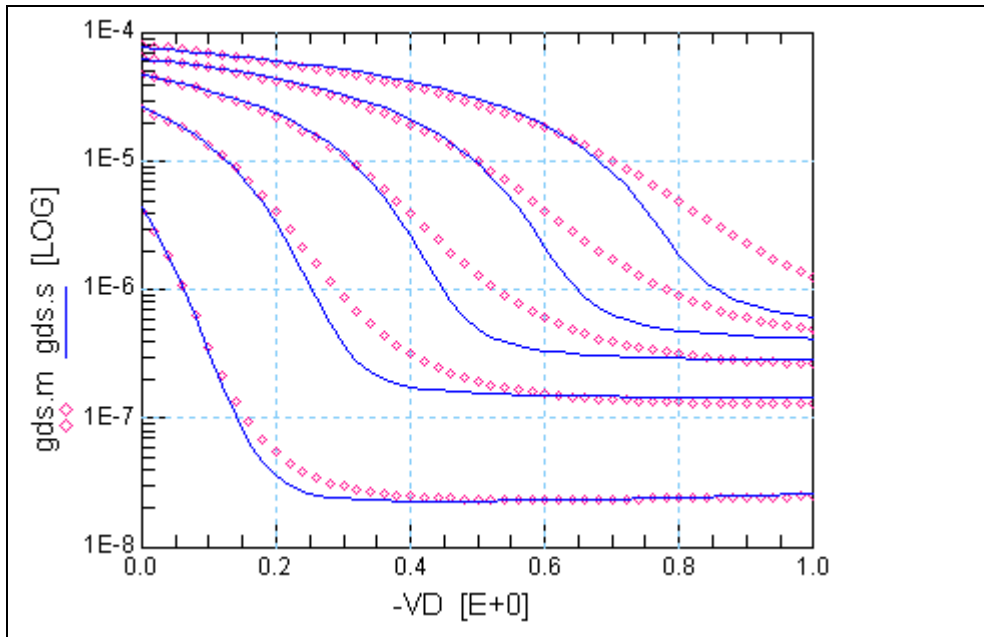


Εξαγόμενη τιμή: $ZC = 10.72m$

$THC = -54.82m$

ID , gds vs VG analysis

gds vs VG



Εξαγόμενη τιμή: $PDITS = 4.600u$

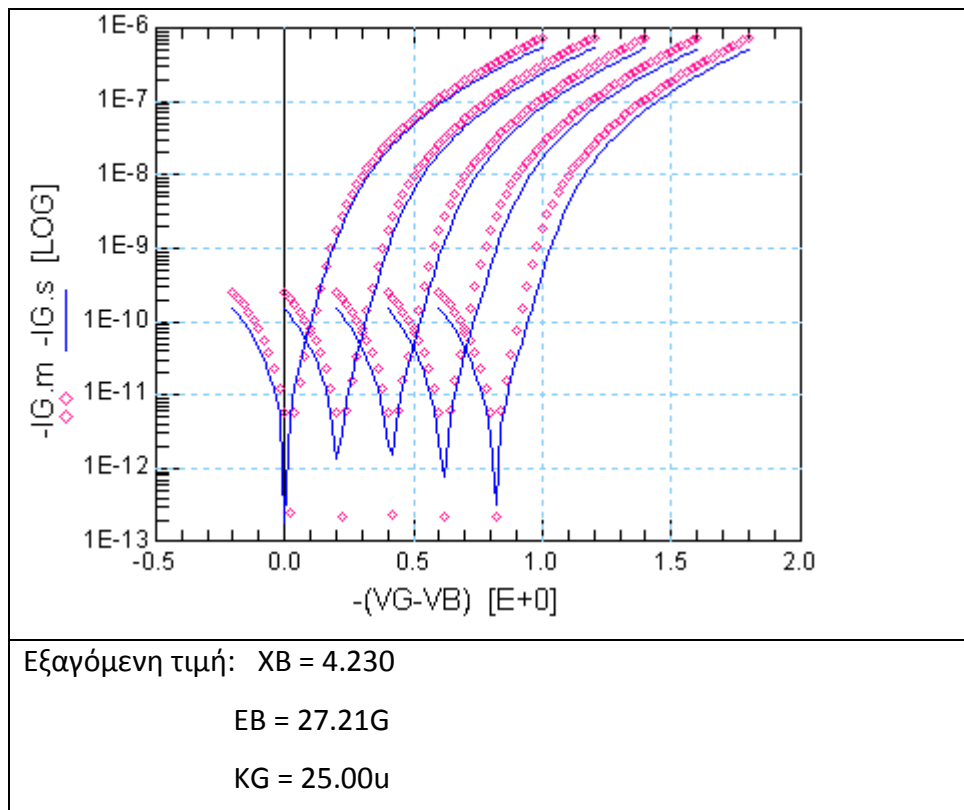
$PDITSD = 1.714p$

$DDITS = 1.265K$

$FPROUT = 1.000MEG$

$LETA0 = 0.000$

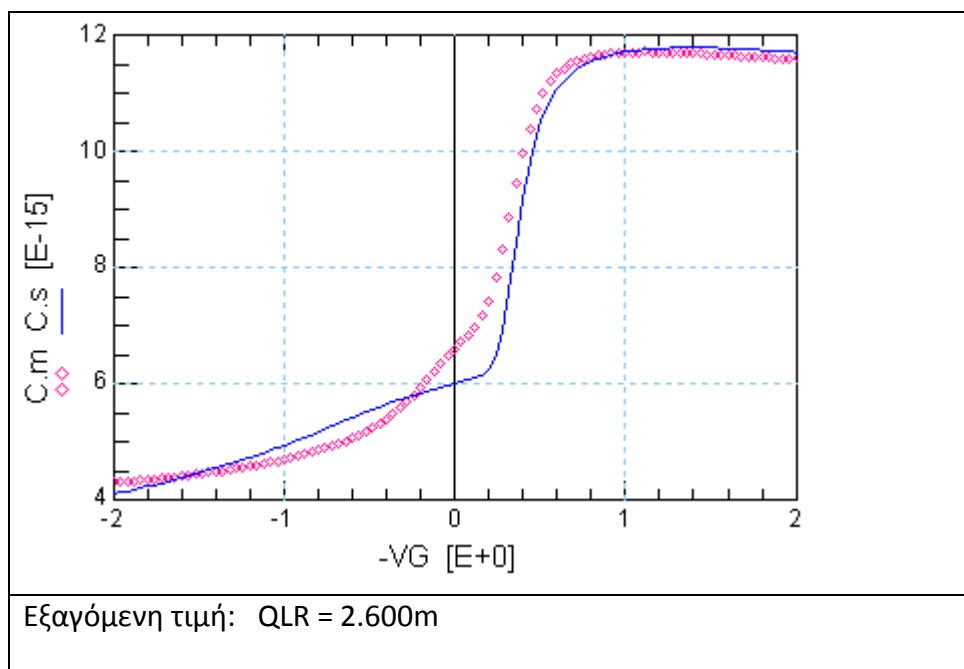
IG vs VG analysis



3.3.2 Short and Wide Channel Device

Η συσκευή που έχουμε επιλέξει έχει ελάχιστο μήκος $L=100n$ και μέγιστο πλάτος $W=10\mu$.

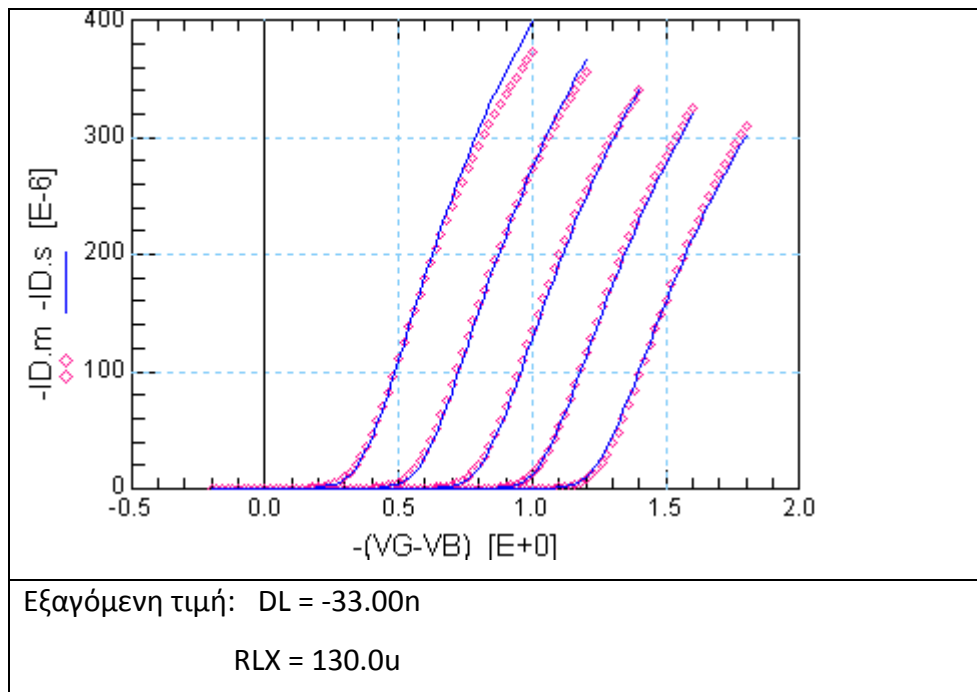
CGC vs.VG analysis

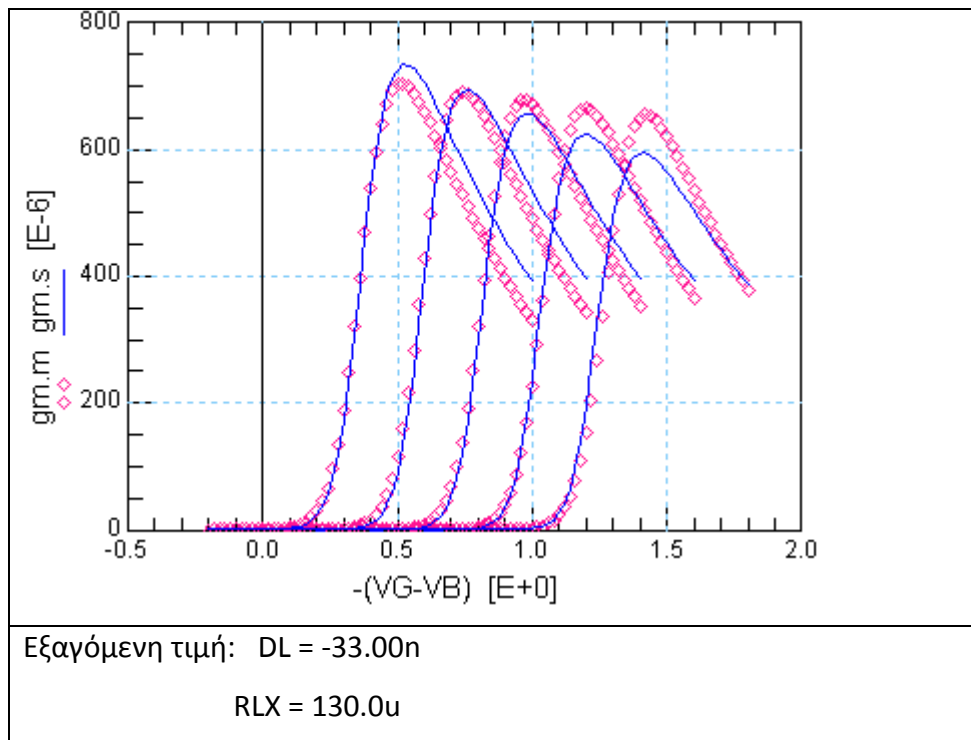


NLR = 220.3m
DL = -33.00n
GAMMAOV = 2.150
LOV = 21.50n
KJF = 0.000

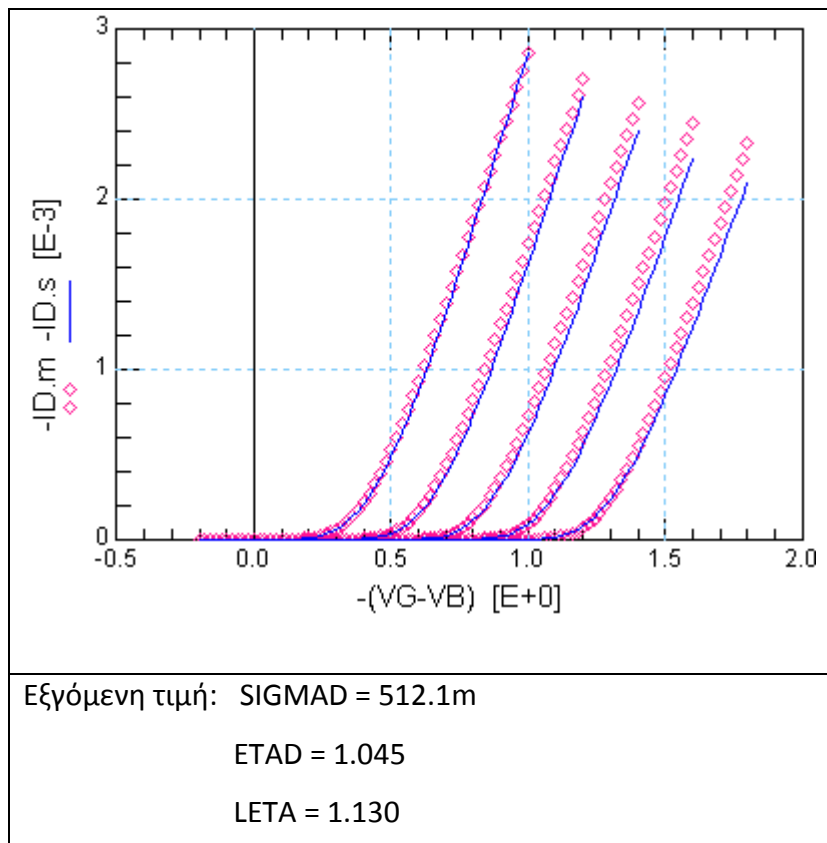
ID vs VG analysis

- στη γραμμική περιοχή

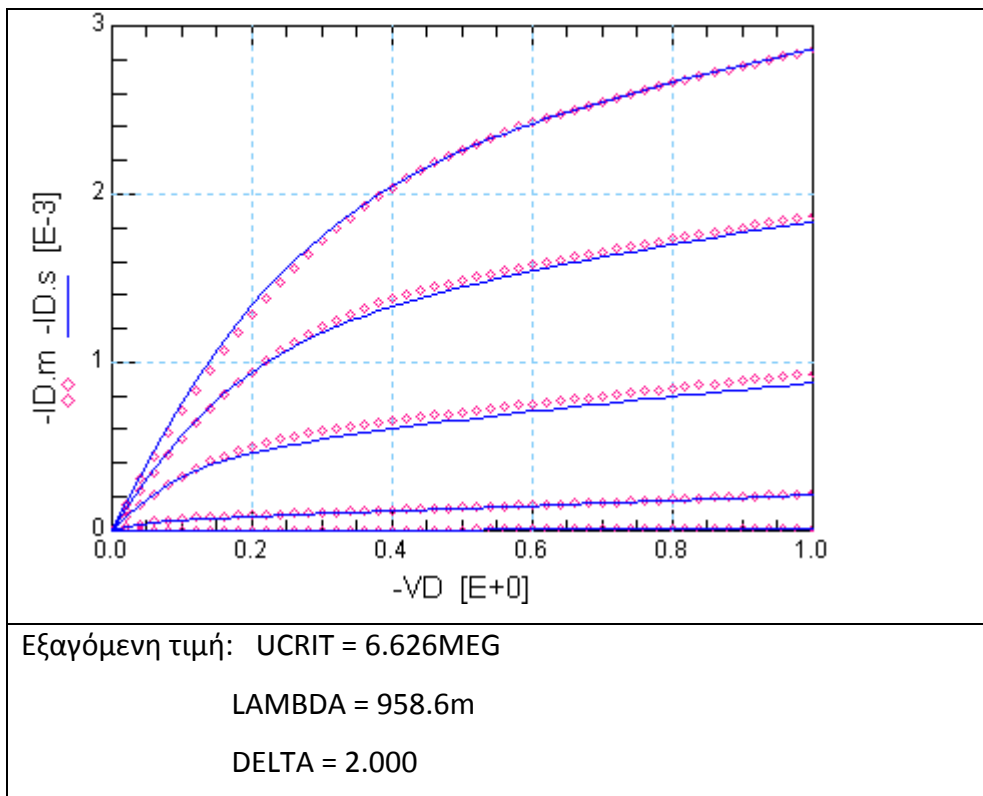




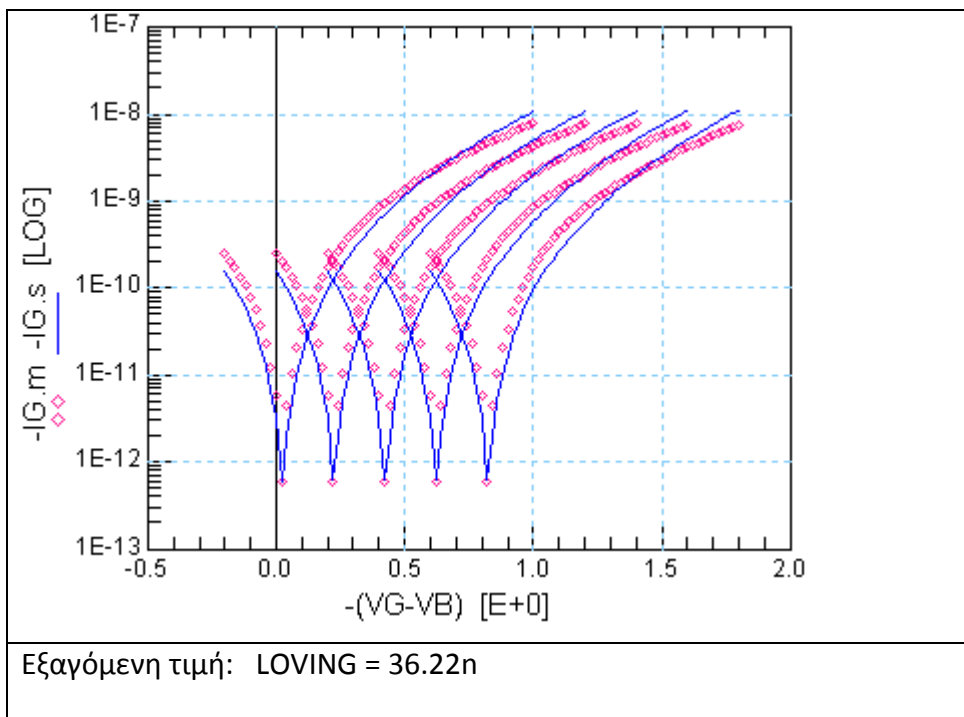
- περιοχή κορεσμού



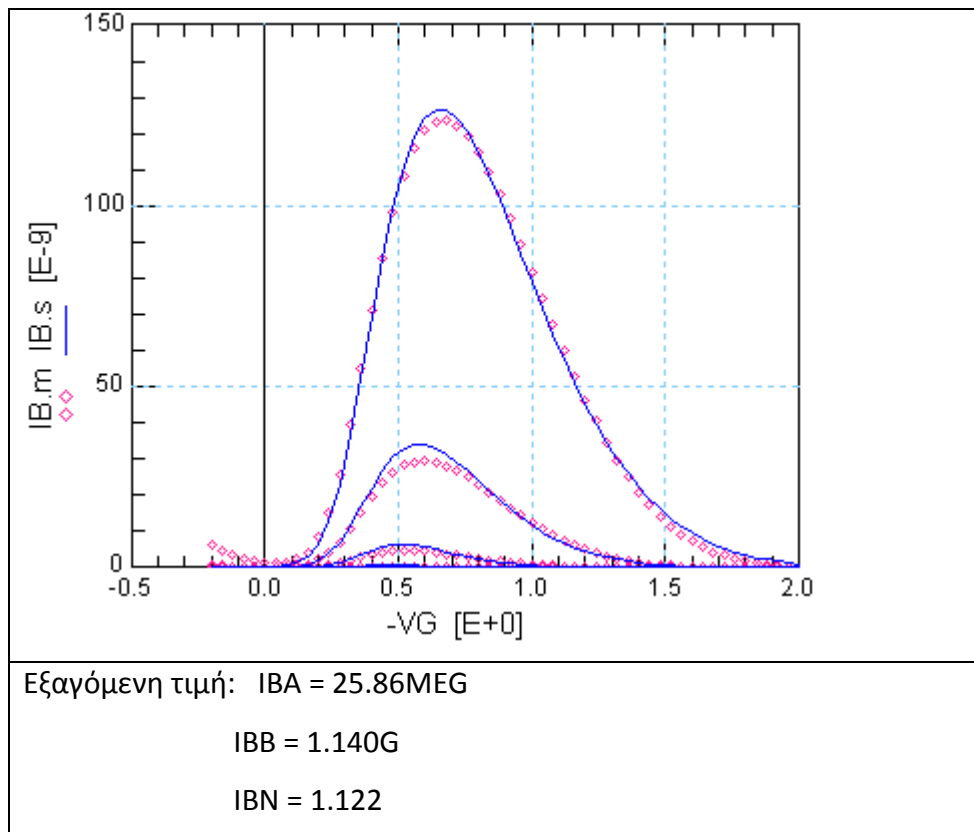
ID vs VD analysis



IG vs VG analysis



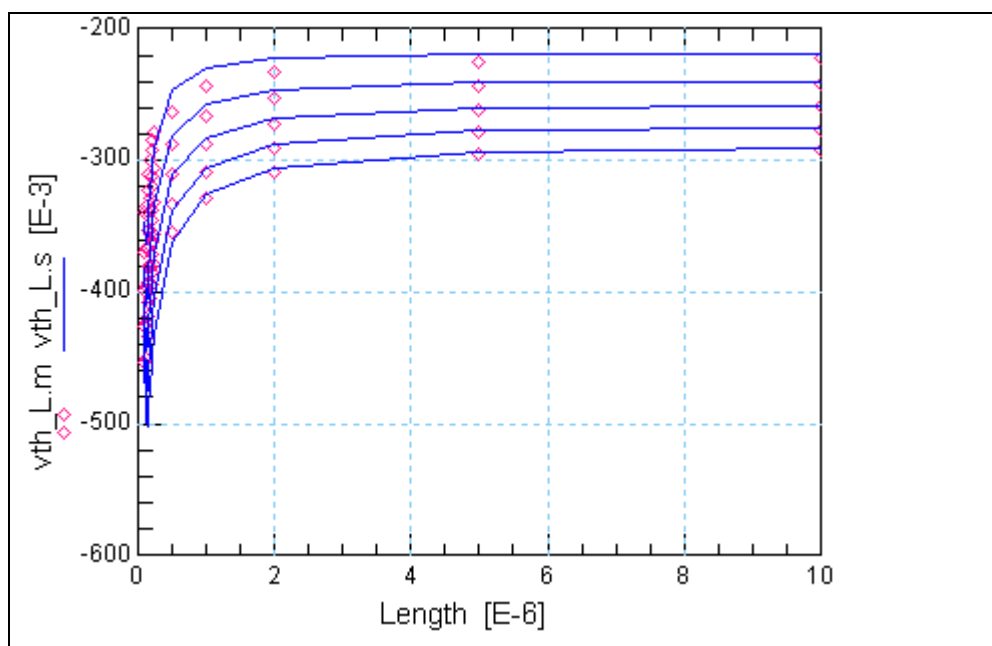
IB vs VG analysis



3.3.3 Length Scaling (Wide Channel Device)

ID vs VG analysis

- σε γραμμική περιοχή

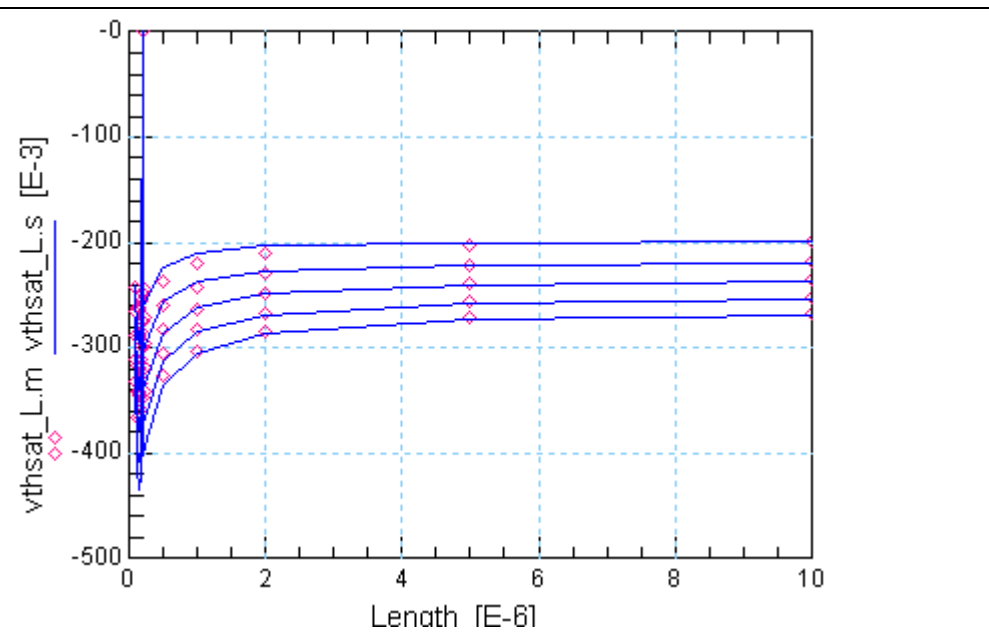


εξαγόμενη τιμή: $QLR = 2.600m$

$NLR = 220.3m$

$LR = 60.25n$

- σε περιοχή κορεσμού

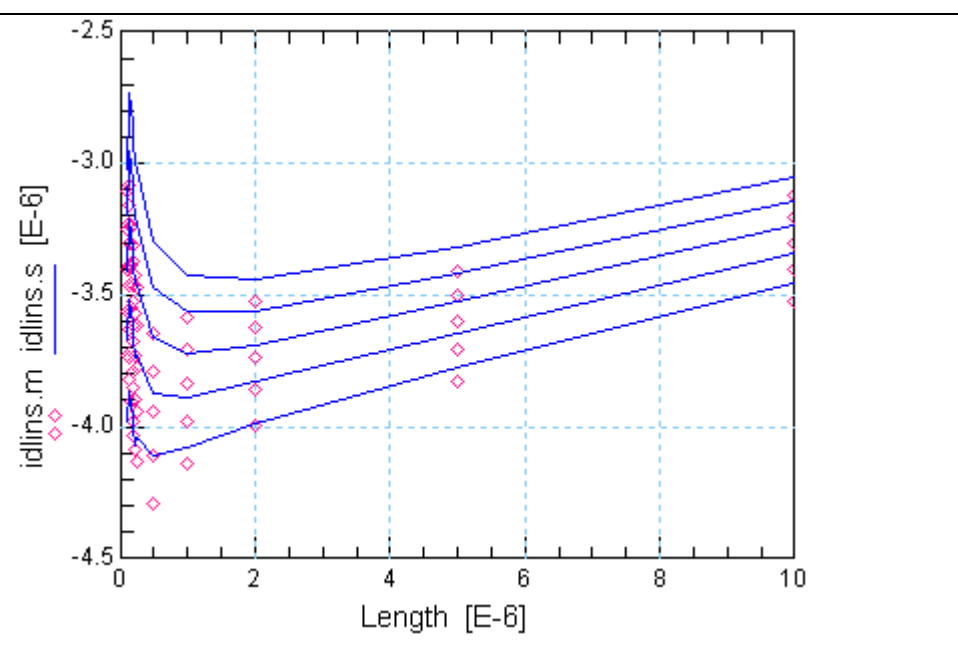


Εξαγόμενη τιμή: $QLR = 2.600m$

$NLR = 220.3m$

$LR = 60.25n$

- σε γραμμική περιοχή
- εστιάζουμε σε ισχυρή αναστροφή



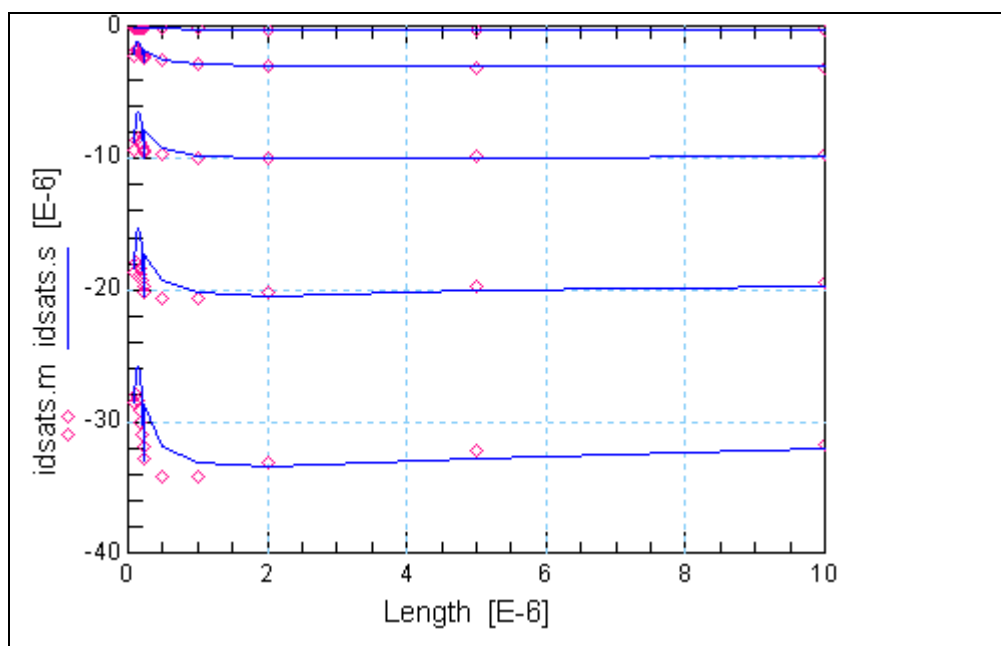
Εξαγόμενη τιμή: $K_A = -145.8m$

$LA = 3.000u$

$KB = 0.000$

$LB = 170.0n$

- σε περιοχή κορεσμού
- εστιάζουμε σε ισχυρή αναστροφή



Εξαγόμενη τιμή: $K_A = -145.8\text{m}$

$LA = 3.000\mu$

$KB = 0.000$

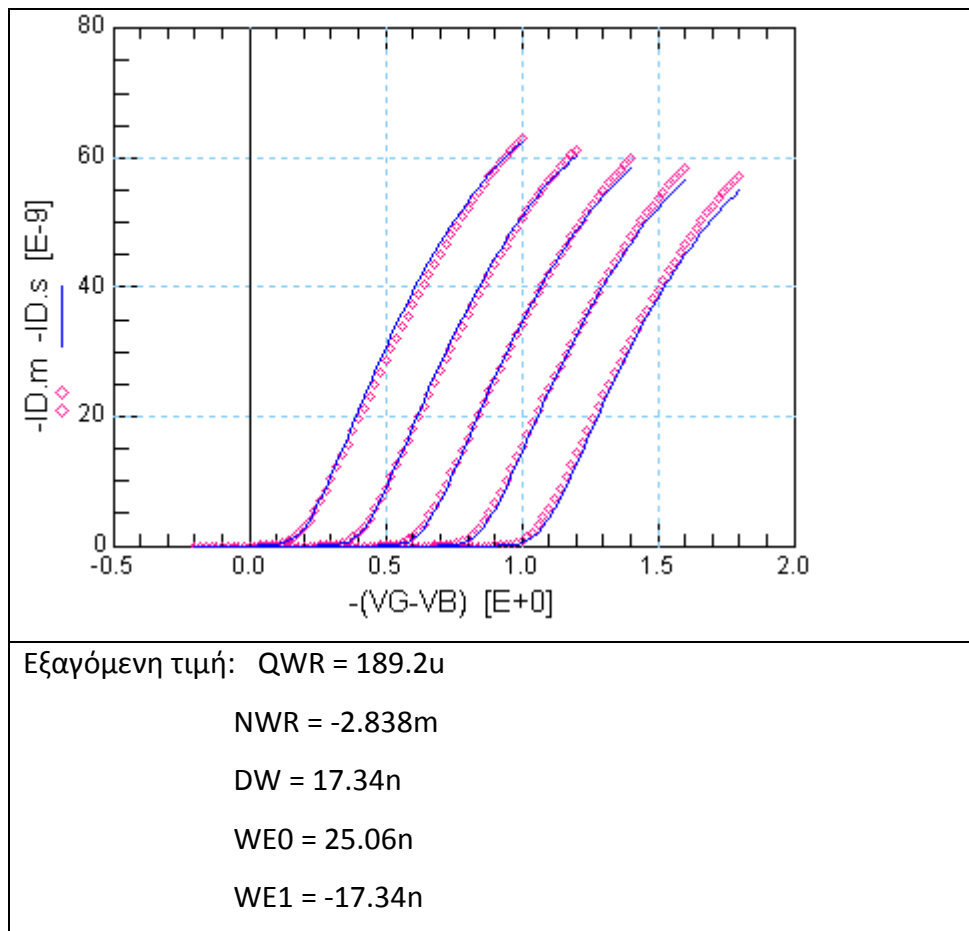
$LB = 170.0\text{n}$:

3.3.4 Long and narrow Channel Device

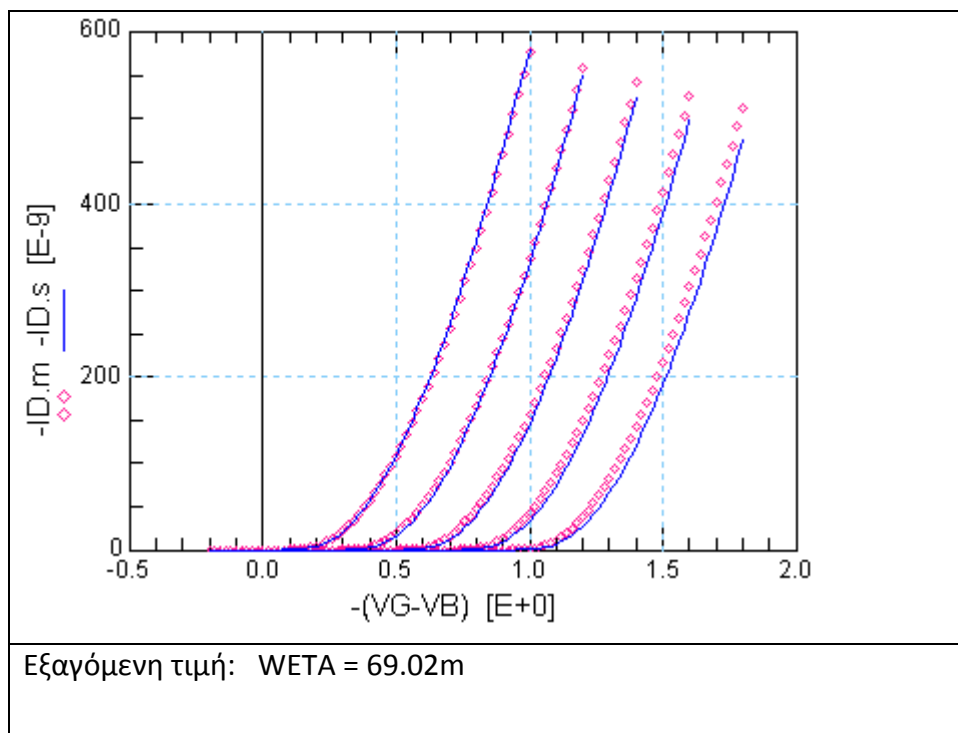
Η συσκευή που επιλέξαμε έχει μέγιστο μήκος $L=10\mu$ και μικρό πλάτος $W=160\text{n}$

ID vs VG analysis

- σε γραμμική περιοχή

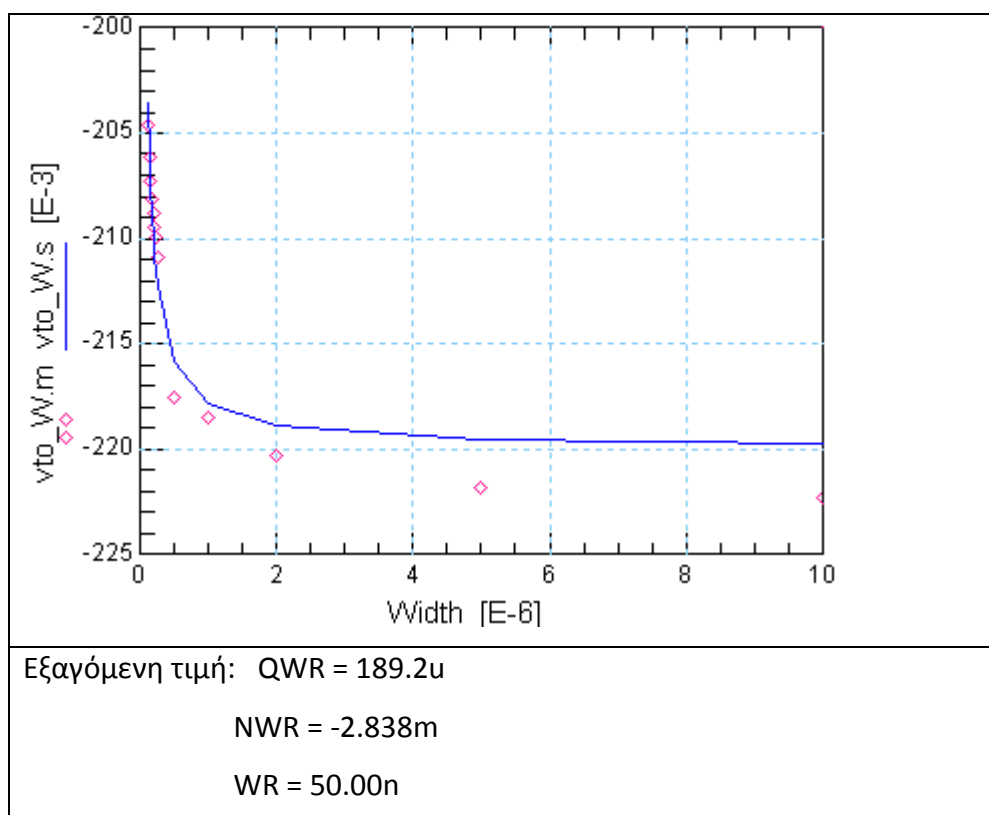


- σε περιοχή κορεσμού



3.3.5 Width Scaling (Long Channel Device)

ID vs VG analysis

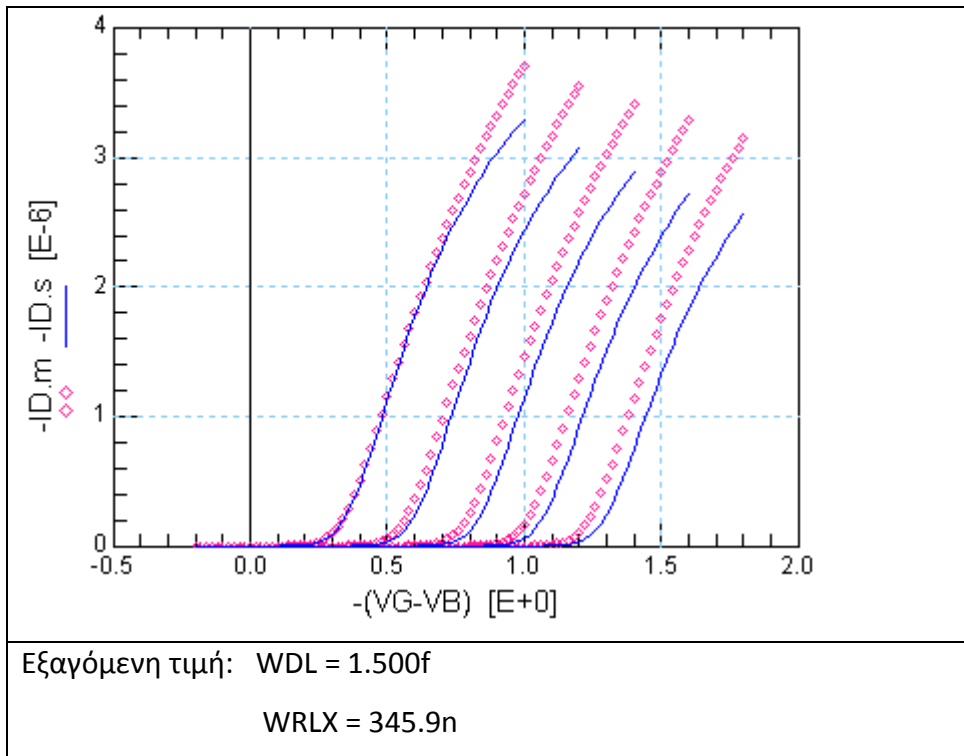


3.3.6 Short and narrow Channel Device

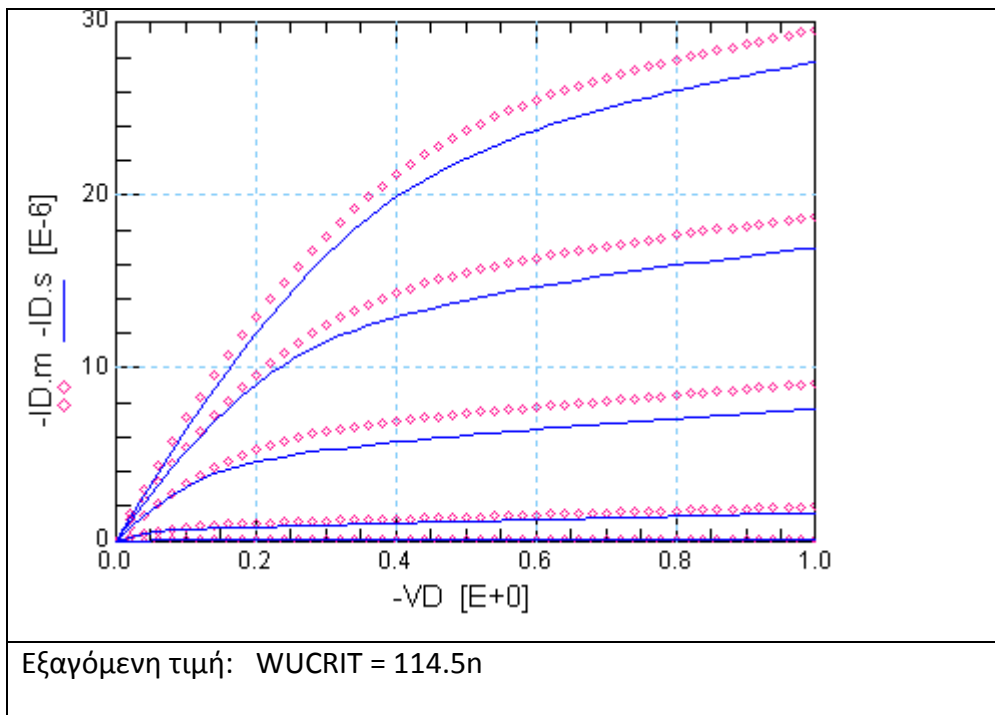
Η συσκευή που επιλέξαμε έχει ελάχιστο μήκος $L=100\text{nm}$ και ελάχιστο πλάτος $W=120\text{nm}$

ID vs VG analysis

- σε γραμμική περιοχή



ID vs VD analysis



Παρακάτω ακολουθεί πίνακας στον οποίο φαίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του μοντέλου EKV3 από τις παραμέτρους του μοντέλου BSIM4, τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS τρανζίστορ

EKV3	BSIM4
Βασικές ηλεκτρικές παράμετροι	
SIGN	-
COX=Eox/TOXE	TOXE
VT0	VTH0
GAMMA	K1
GAMMA=sqrt(2qEsi. NDEP)/COX	NDEP
GAMMAG=sqrt(2qEsi. NGATE)/COX	NGATE
PHIF= UT.ln(NDEP/ni)	NDEP
KP=U0.COX	U0
UCRIT=2VSAT/U0	VSAT
TCV=KT1/TNOM	KT1
BEX	UTE
Γεωμετρικές παράμετροι	
DL=-2LINT	LINT
DW=-2WINT	WINT
XL	XL
XW	XW
LL	LL
LLN	LLN
DLC=-2DLC	DLC
DWC=-2DWC	DWC
XJ	XJ
Χωρητικότητες overlap	
CGSO	CGSO
CGDO	CGDO
CGBO=CGBO/2	CGBO
Παράμετροι ρεύματος υποστρώματος	
IBB=BETA0/ sqrt(XJ.Esi/COX)	BETA0
IBA=ALPHA1.IBB	ALPHA1
Παράμετροι Gate Induced Drain/Source Leakage (GIDL/GISL)	

AGIDL	AGIDL
BGIDL	BGIDL
CGIDL	CGIDL
EGIDL	EGIDL
Παράμετροι διόδων	
PDITS	PDITS
PDITSD	PDITSD
NJS	NJS
JSS	JSS
JSSWS	JSWS
JSSWGS	JSWGS
MJS	MJS
MJJWGS	MJSGS
PBS	PBS
CJS	CJN
CJSWS	CJSWN
CJSWGS	CJSWGN
XJBVS	XJBVS
BVS	BVS
XTIS	XTIS

Επίσης στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε δύο πολύ σημαντικές επισημάνσεις:

- 1) Χρειάζεται πολύ μεγάλη προσοχή στην μετατροπή λόγω άλλων συμβατικών μεγεθών στα μοντέλα (μετρικό σύστημα για EKV)
- 2) Ο πίνακας αυτός δεν είναι πλήρης , καθώς περιέχει ένα σύνολο βασικών παραμέτρων και θα μπορούσαμε να αποτελέσει θέμα για μελλοντική εργασία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Συμπεράσματα

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαγωγής παραμέτρων 'BSIM4 σε EKV3'.

Έχοντας τις “μετρήσεις” του BSIM4 με τη διαδικασία που περιγράψαμε στα προηγούμενα κεφάλαια καταλήξαμε να εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου EKV3. Με δεδομένο τη δυσκολία της διαδικασίας ο στόχος μας επιτεύχθηκε σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς καταφέραμε να κάνουμε μια πολύ λεπτομερή διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων στην τεχνολογία των 90nm, γεγονός που μας επιτρέπει τη χρήση του μοντέλου στο σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτό μπορούμε εύκολα να το διακρίνουμε από την προσέγγιση των γραφικών παραστάσεων του ενός και του άλλου μοντέλου στην τεχνολογία των 90nm τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS.

Επίσης πρέπει να αναφέρουμε πως η αυτοματοποίηση της διαδικασίας έγκειται στα παρακάτω βήματα:

- 1) Άμεσης προσαρμογής παραμέτρων όπου αυτό είναι εφικτό (συν τις "default τιμές" για άλλες παραμέτρους),
- 2) Στη χρήση τοπικής βελτιστοποίησης για την εισαγωγή παραμέτρων , διαδοχικά, σε επιλεγμένες περιοχές,
- 3) Επαναλήψεων των παραπάνω,
- 4) Εντολές σε είδος script (macro) για την εκτέλεση των παραπάνω,
- 5) Μη αυτόματες επεμβάσεις όταν το αποτελεσμα των βημάτων βελτιστοποίησης δεν δίνουν τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα..

Φυσικά οφείλουμε να τονίσουμε πως δεν έχουμε φτάσει στο σημείο της αυτοματοποίησης του συστήματος ακόμη. Έτσι η διαδικασία μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική στο μέλλον με πιο λεπτομερή αντιστοίχιση παραμέτρων, καθώς επιδέχεται ακόμα περισσότερη βελτίωση για απόδοση σωστότερων τιμών των παραμέτρων στη δεδομένη τεχνολογία που μελετήσαμε και ακόμη επιδέχεται περαιτέρω ανάπτυξη για την εξαγωγή και των υπόλοιπων παραμέτρων του μοντέλου EKV3.

Αναφορές

- [1] C. C. Enz, F. Krummenacher, and E. A. Vittoz, "An Analytical MOS Transistor Model Valid in All Regions of Operation and Dedicated to Low-Voltage and Low-Current Applications," *Analog Integr. Circ. Signal Process. J.*, Vol. 8, pp. 83–114, July 1995.
- [2] M. Bucher, C. Lallement, C. Enz, F. Theodoloz, F. Krummenacher, "The EPFL-EKV MOSFET Model Equations for Simulation", Technical Report, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), June 1997.
- [3] M. Bucher, "Analytical MOS Transistor Modelling for Analog Circuit Simulation," Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Thesis No. 2114, 1999.
- [4] A. Bazigos, M. Bucher, F. Krummenacher, J.-M. Sallese, A. Roy, C. Enz, "EKV3MOSFET Compact Model Documentation", Technical Report, Technical University of Crete, September 2008.
- [5] A. Bazigos, "Μοντελοποίηση MOS Τρανζίστορ σε Υψηλές Συχνότητες", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάιος 2008.
- [6] Silvaco, EKV, Low Power MOSFET Model,[Available Online]
<http://www.silvaco.com/products/analog/spicemodels/models/ekv/ekv.html>
- [7] Silvaco, BSIM4, Industry Standard Sub-0.13 Micron MOSFET Model [AvailableOnline]
<http://www.silvaco.com/products/analog/spicemodels/models/bsim4/bsim4.html>
- [8] Silvaco, HiSIM, Surface Potential-Based MOSFET Model [Available Online:]
<http://www.silvaco.com/products/analog/spicemodels/models/hisim/hisim.html>
- [9] Silvaco, PSP, Surface Potential-Based MOSFET Model [Available Online:]
http://www.silvaco.com/products/analog/spicemodels/models/psp/psp_level1000.html
- [10] A. Bazigos, M. Bucher, "The EKV3.0 Model Code and Parameters Extraction" , EKV Model User's Group Meeting and Workshop, [Available Online:]<http://legwww.epfl.ch/ekv/workshop>, EPFL, Lausanne, Switzerland, November 4-5, 2004

