



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών**

Εργαστήριο Ηλεκτρονικής

Μάριος Σ. Κάτσης

Διπλωματική Εργασία

**«Χαρακτηρισμός και μοντελοποίηση
προχωρημένης MOSFET τεχνολογίας»**

Εξεταστική Επιτροπή:

Bucher Matthias (Επιβλέπων)

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Μπάλας Κωνσταντίνος

**Χανιά,
Οκτώβρης 2008**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή, κ. **Matthias Bucher**, για την βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Οι εμπειρίες που αποκόμισα κρίνονται μόνον ως ιδιαιτέρως θετικές και πολύτιμες και τον ευχαριστώ για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με την εργασία αυτή.

Ευχαριστίες οφείλονται και στους καθηγητές κ. **Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη** και κ. **Κωνσταντίνο Μπάλα** που αποτελούν την εξεταστική επιτροπή, για το χρόνο που διέθεσαν για τη μελέτη της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα θερμά τους συναδέλφους μου και μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου Ηλεκτρονικής, και ιδιαιτέρως τον **Νίκο Μαυρεδάκη**, οι οποίοι μου συμπεριφέρθηκαν άψογα και συνέβαλλαν και αυτοί με τις γνώσεις τους και την εμπειρία τους στην καθοδήγησή μου.

Μάριος Σ. Κάτσης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1	Γενικά για τη MOSFET τεχνολογία	3
1.2	Δομή της Διπλωματικής.....	3
2	Συνδεσμολογία εργαστηρίου	6
2.1	Prober Cascade Microtech Summit 10600	7
2.2	HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer	7
2.3	Agilent E4980A Precision LCR Meter	8
2.4	Λογισμικό εργαστηρίου Agilent ICCAP 2006B.....	9
2.4.1	Εισαγωγή στο λογισμικό Agilent ICCAP 2006B	9
3	Το compact Μοντέλο EKV3	15
3.1	Ιστορική Αναδρομή	15
3.2	Αρχές λειτουργίας του μοντέλου EKV3	15
3.2.1	Ορισμός βασικών μεγεθών του EKV3	17
3.2.2	Ρεύμα καναλιού	19
3.2.3	Διαγωγιμότητες και φορτία.....	21
3.2.4	Οι Χωρητικότητες στο EKV3 μοντέλο.....	24
3.2.5	Η Θερμοκρασία στο EKV3 μοντέλο	25
3.2.6	Οι Δίοδοι στο μοντέλο EKV3	26
3.2.7	Μη ιδανικά φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση του MOSFET...28	
3.3	Συμπεράσματα-Πλεονεκτήματα του EKV3 μοντέλου	30
4	Μετρήσεις και εξαγωγή παραμέτρων στην τεχνολογία 0.5um.....	32
4.1	Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων	32
4.2	Η λειτουργία του EKV3 μοντέλου	35
4.3	Μετρήσεις και εξαγωγή I-V παραμέτρων του EKV301.02 μοντέλου.....	36
4.3.1	Παράμετροι I-V για wide-long τρανζίστορ (10x10um)	36
4.3.2	Παράμετροι I-V για wide-short τρανζίστορ (10x 0.5um).....	39
4.4	Μετρήσεις και εξαγωγή C-V παραμέτρων του EKV301.02 μοντέλου	42
4.4.1	Παράμετροι C-V για wide-long τρανζίστορ (660um/76um)	42
4.4.2	Παράμετροι C-V για wide-short τρανζίστορ(96.10mm/500nm)	44
4.5	Θερμοκρασιακή ανάλυση στα I-V δεδομένα.....	47
4.5.1	Παράμετροι Θερμοκρασίας για τρανζίστορ wide-long(10x10um)	48
4.5.2	Παράμετροι Θερμοκρασίας για τρανζίστορ wide-short(10x0.5um)	51
4.6	Μετρήσεις και εξαγωγή παραμέτρων για τις Διόδους του Μοντέλου.....	52
5	Ο κυκλικός ταλαντωτής του κυκλώματος (ring oscillator)	56
6	Συμπεράσματα	59
7	Αναφορές	60
	Παράρτημα I	61
	Παράρτημα II.....	69
	Παράρτημα III.....	75
	Παράρτημα IV	83
	Παράρτημα V.....	87

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά για τη MOSFET τεχνολογία

Στη σύγχρονη εποχή, η τεχνολογία η οποία κυριαρχεί στη σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων και στην κατασκευή μικροεπεξεργαστών και μνημών είναι η **CMOS** (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) τεχνολογία. Και αυτό διότι συνδυάζει το χαμηλό κόστος με την υψηλή απόδοση. Η ανάπτυξη της **MOSFET** (MOS Field Effect Transistor) τεχνολογίας είναι τόσο μεγάλη ώστε μπορούμε σήμερα να μιλάμε για μήκη καναλιών ίσα με $0.03\mu\text{m}$. Πιθανόν να κυριαρχήσει για τουλάχιστον δύο δεκαετίες ακόμα η τεχνολογία αυτή και όπως γίνεται αντιληπτό μπορούμε πλέον να έχουμε πολύ περισσότερα από δέκα εκατομμύρια τρανζίστορ σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο.

Σε πολλές εφαρμογές, τα ψηφιακά κυκλώματα έχουν αντικαταστήσει τα αναλογικά, ωστόσο τα αναλογικά κυκλώματα παραμένουν άρρηκτα συνδεδεμένα ιδιαίτερα στην επεξεργασία φυσικών σημάτων και την επικοινωνία με τον άνθρωπο. Η σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων έχει όμως κατά πολύ αυξημένες απαιτήσεις από τα μοντέλα σχεδίασης και προσομοίωσης, σχετικά με όσα μοντέλα ανέπτυξε το πανεπιστήμιο Berkeley (BSIM μοντέλα), που κυριαρχούσαν στη βιομηχανία την τελευταία δεκαετία. Το EKV3 μοντέλο απευθύνεται σε σχεδίαση αναλογικών και RF κυκλωμάτων με πολύ προχωρημένη τεχνολογία CMOS, συμπεριλαμβανομένων των γενειών 90nm και κάτω. Από την άλλη, υπάρχουν πολλές ανάγκες να καλυφθούν και σε σχεδίαση με λιγότερο εξελιγμένη τεχνολογία, όπως είναι η γενειά των $0.5\mu\text{m}$ CMOS τεχνολογιών, που συνεχίζονται να εφαρμόζονται σε μια ευρία αγορά προϊόντων χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους, για παράδειγμα, ρολόγια. Έτσι προέκυψε η ανάγκη να πιστοποιηθεί η εγκυρότητα του EKV3 μοντέλου για $0.5\mu\text{m}$ CMOS τεχνολογία, που είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

1.2 Δομή της Διπλωματικής

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη MOSFET τεχνολογίας **$0.5\mu\text{m}$** που πραγματοποιήθηκε μέσω on wafer μετρήσεων και η περιγραφή της από το μοντέλο **EKV3** μέσω της εξαγωγής των παραμέτρων του μοντέλου. Για τον λόγο

αυτό, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, τόσο **I-V(current-voltage)**, όσο και **C-V (capacitance-voltage)** μετρήσεις σε low-voltage τρανζίστορ καθώς και εξαγωγή παραμέτρων θερμοκρασίας στην 0.5um MOSFET τεχνολογία. Σκοπός είναι να προσαρμοστεί το μοντέλο στην τεχνολογία αυτή, και να παρουσιαστεί ολοκληρωμένα το **EKV3** μοντέλο. Τέλος, θα γίνει και προσομοίωση ενός αναλογικού κυκλώματος με την υλοποίηση ενός **κυκλικού ταλαντωτή 11 σταδίων** της 0.5um τεχνολογίας, με τις παραμέτρους του μοντέλου που έχουμε εξάγει για να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα λειτουργίας του.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο RFIC lab του Πολυτεχνείου Κρήτης και έλαβαν χώρα το διάστημα Φεβρουάριος-Ιούλιος 2008. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των τρανζίστορ αλλά και την εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου είναι το **ICCAP**.

-- Στο **Κεφάλαιο 2**, παρουσιάζεται η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο, έτσι ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι μετρήσεις των διαθέσιμων τρανζίστορ, καθώς και μια σύντομη εισαγωγή στη λειτουργία του λογισμικού ICCAP.

-- Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάζεται το EKV3 μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των μετρήσεων. Παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του, τα φαινόμενα που καλύπτει (γραμμικά και μη) και τέλος αναφέρονται στοιχεία που εξηγούν τους λόγους για τους οποίους υπερτερεί έναντι των άλλων μοντέλων.

-- Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων του μοντέλου EKV 301.02. Αναλύονται ένα ένα τα βήματα που ακολουθούνται από γεωμετρία σε γεωμετρία μέχρις ότου να ολοκληρωθεί το μοντέλο στην 0.5um τεχνολογία. Τέλος, αναφερόμαστε σε κάποια στοιχεία που είναι απαραίτητα για να αναπτυχθεί μια καλή εμπειρία με τις παραμέτρους του μοντέλου. Η εμπειρία αυτή αποκτάται με το να παρατεθούν ενδεικτικές προσομοιώσεις και το πώς αυτές εξαρτώνται από τις αλλαγές στις τιμές των βασικών παραμέτρων του μοντέλου. Οι προσομοιώσεις που θα παρατεθούν, αφορούν τις μετρήσεις *ρεύματος-τάσης (I-V)*, τις μετρήσεις χωρητικότητας (*C-V*), των υπεύθυνων παραμέτρων για τη *θερμοκρασιακή ανάλυση* στις διαθέσιμες θερμοκρασίες και τέλος παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις για τα *ρεύματα* και τις *χωρητικότητες των διόδων* που αναπτύσσονται στο extrinsic μέρος του μοντέλου.

-- Στο **Κεφάλαιο 5**, δημιουργούμε το κύκλωμα του κυκλικού ταλαντωτή (ring oscillator) 11 στοιχείων στο πρόγραμμα *ADS* (Advanced Design Systems) και εισάγουμε τις παραμέτρους που έχουμε εξαγάγει για να διαπιστωθεί η ορθότητα της λειτουργίας του μοντέλου EKV301.02 στην τεχνολογία 0.5um.

-- Στο **Κεφάλαιο 6**, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν με το πέρας αυτής της διπλωματικής εργασίας.

-- Στο **Κεφάλαιο 7**, παρουσιάζονται οι αναφορές σε κείμενα και δημοσιεύσεις οι οποίες ήταν χρήσιμες και βοήθησαν στην ανάλυση και την περάτωση της εργασίας αυτής.

-- Στο **Παράρτημα I**, αναφέρεται η λίστα παραμέτρων που υπάρχει στο μοντέλο EKV301.02, κατηγοριοποιημένες ανάλογα με το φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζουν.

-- Στο **Παράρτημα II**, υπάρχει αναλυτική αναφορά των **I-V** και **C-V setup** που έχουν γίνει για την μέτρηση των NMOS και PMOS τρανζίστορ της CMOS τεχνολογίας **0.5um**. Τέλος δίνεται ολοκληρωμένο και το σετ των παραμέτρων του compact EKV301.02 Μοντέλου για την τεχνολογία αυτή.

-- Στο **Παράρτημα III**, παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις *ρεύματος-τάσης* (*I-V*), για τις γεωμετρίες wide-long και wide-short σε NMOS και PMOS τρανζίστορ.

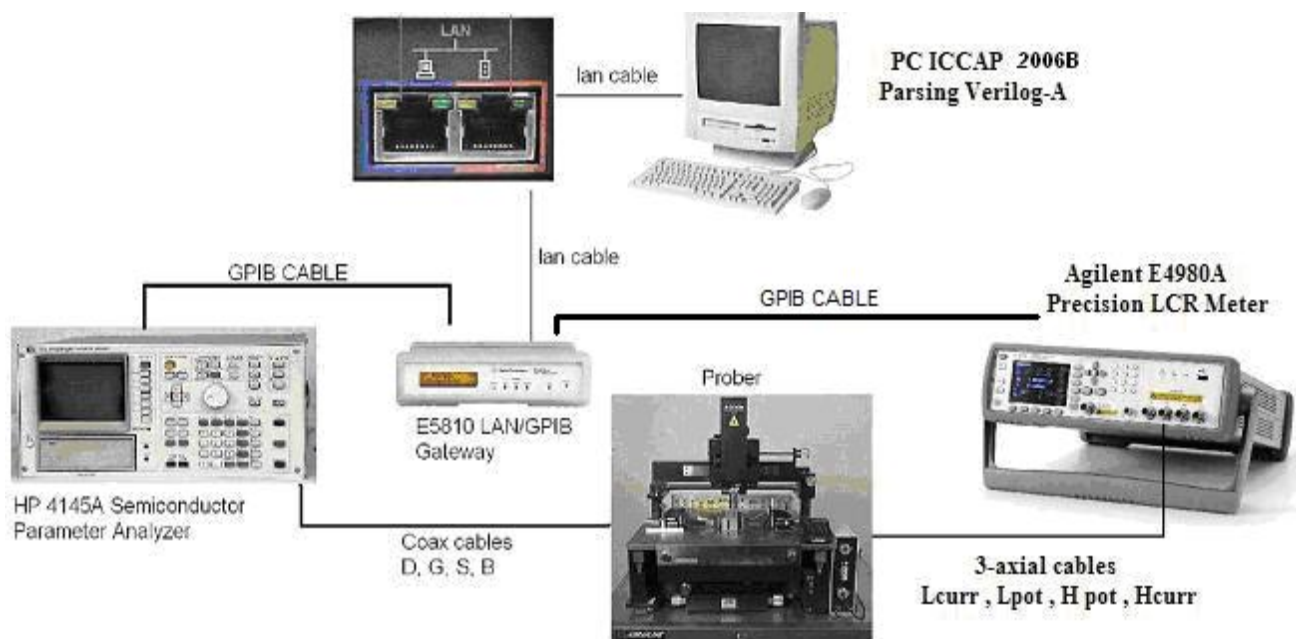
-- Στο **Παράρτημα IV**, παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις για την χωρητικότητα (*C-V*), για τις γεωμετρίες wide-long και wide-short σε NMOS και PMOS τρανζίστορ αντίστοιχα.

-- Στο **Παράρτημα V**, παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις για την *θερμοκρασιακή ανάλυση* (23, 85, 115 °C) αλλά και την επιρροή βασικών παραμέτρων του μοντέλου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

2 Συνδεσμολογία εργαστηρίου

Οι μετρήσεις των τρανζίστορ πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (www.rfic.tuc.gr) και στη συνέχεια έγινε η εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου τόσο για τις I-V όσο και για τις C-V μετρήσεις αλλά και τις παραμέτρους θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό αναλύουμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για να γίνουν οι μετρήσεις των τρανζίστορ και η εξαγωγή των δεδομένων της θερμοκρασίας στον χώρο του εργαστηρίου.

Η τοπολογία της σύνδεσης του εξοπλισμού που διατίθεται στο εργαστήριο φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα που ακολουθεί:



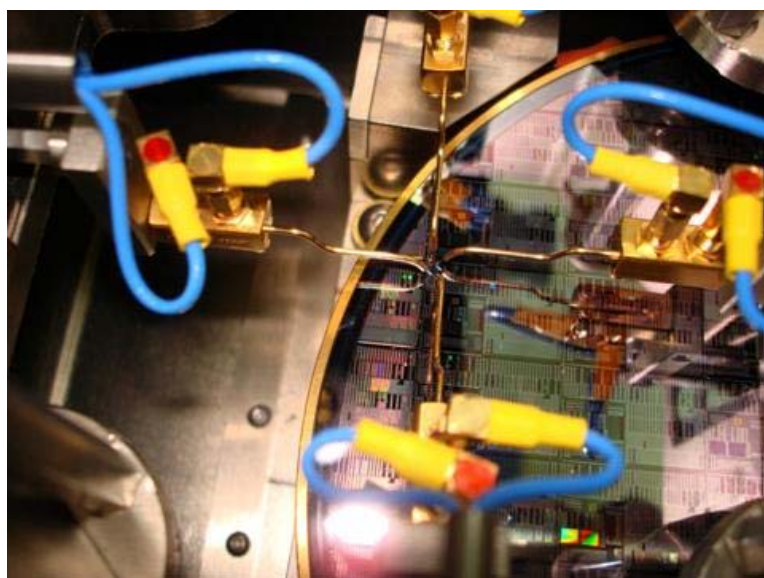
Σχ. 2.1 Συνδεσμολογία εξοπλισμού στο εργαστήριο

2.1 Prober Cascade Microtech Summit 10600

Το όργανο μέτρησης που διαθέτουμε στον εργαστήριο είναι ο *Prober Cascade Microtech SUMMIT 10600*. Σε αυτόν τοποθετείται το wafer όπου και βρίσκονται τα προς μέτρηση τρανζίστορ. Τα συνοδευτικά manual του κάθε wafer, μας κατατοπίζουν στο που βρίσκονται τα τρανζίστορ που επιθυμούμε να μετρήσουμε και εκεί εφαρμόζουμε τις 4 dc probes. Οι βελόνες αυτές ξύνουν το λεπτό στρώμα που βρίσκεται πάνω από το κάθε τρανζίστορ, πραγματοποιούν ηλεκτρική επαφή με αυτό, εφαρμόζεται η επιθυμητή τάση και δημιουργούνται ρεύματα, τα οποία μετρούνται στο εργαστήριο από τον αναλυτή παραμέτρων HP 4145A που διαθέτουμε.



Σχ. 2.2 Prober Cascade Microtech Summit 10600



Σχ. 2.3 Οι DC βελόνες επαφίενται στο wafer

2.2 HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer

Ο αναλυτής παραμέτρων που διαθέτουμε στο εργαστήριο είναι ο *HP 4145 Semiconductor Parameter Analyzer*. Διαθέτει θύρα για καλώδιο GPIB. Έτσι καταφέρνουμε να συνδέεται ο αναλυτής παραμέτρων με τον υπολογιστή μέσω του *E5810 LAN/GPIB Gateway*, ο οποίος κατά κάποιο δρόμο σαν συνδετικός κρίκος στην περίπτωση αυτή. Ο αναλυτής παραμέτρων συνδεδεμένος με τον υπολογιστή, εφαρμόζει τις τάσεις που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε σε κάθε ένα από τα **Drain**, **Gate**, **Source** και **Bulk** στο προς μέτρηση τρανζίστορ. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω 4 -

coaxial καλωδίων, τα οποία συνδέουν τον αναλυτή παραμέτρων με τον prober. Τα 4 αυτά καλώδια βγαίνουν από τις εξόδους *SMU1*, *SMU2*, *SMU3*, *SMU4* του αναλυτή παραμέτρων και αντιστοιχίζονται στα Drain, Gate, Source, Bulk στον prober.



Σχ 2.4. HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer

2.3 Agilent E4980A Precision LCR Meter

Ο *Agilent E4980A* είναι ένας *LCR(inductor capacitance resistance)* μετρητής γενικού σκοπού ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των προς μέτρηση συστατικών ηλεκτρονικών στοιχείων, για τον έλεγχο της ποιότητάς τους καθώς και για ευρύτερη εργαστηριακή χρήση. Χρησιμοποιείται κυρίως στον υπολογισμό LCR συστατικών, υλικών, και συσκευών ημιαγωγού για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων (από 20Hz έως 20MHz) καθώς και για έλεγχο σημάτων δοκιμής ($0.1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ έως 2 V_{rms} και 50 A έως $20 \text{ mA}_{\text{rms}}$). Επίσης διαθέτει επιλογή στην οποία το σήμα δοκιμής έχει εύρος επιπέδου από 0.1 mV έως $20 \text{ V}_{\text{rms}}$ και 50 A έως $200 \text{ mA}_{\text{rms}}$. Τέλος επιτρέπει μετρήσεις άνω των $40 \text{ V}_{\text{rms}}$ DC, DCR καθώς και μετρήσεις DC πηγής τάσης χρησιμοποιώντας την εσωτερική πηγή τάσης που διαθέτει.

Στο εργαστήριο ο *Agilent E4980A* συνδέεται άμεσα με τον Prober μέσω 4 coaxial καλωδίων. Οι εξοδοί του **Low-current** και **Low-potential** συνδέονται σε μια probe, την *Low probe* και οι άλλες δύο **High-current** και **High-potential** συνδέονται

στη δεύτερη probe, την *High probe*. Η συνδεσμολογία φαίνεται αντιπροσωπευτικά και στο σχήμα 2.1.



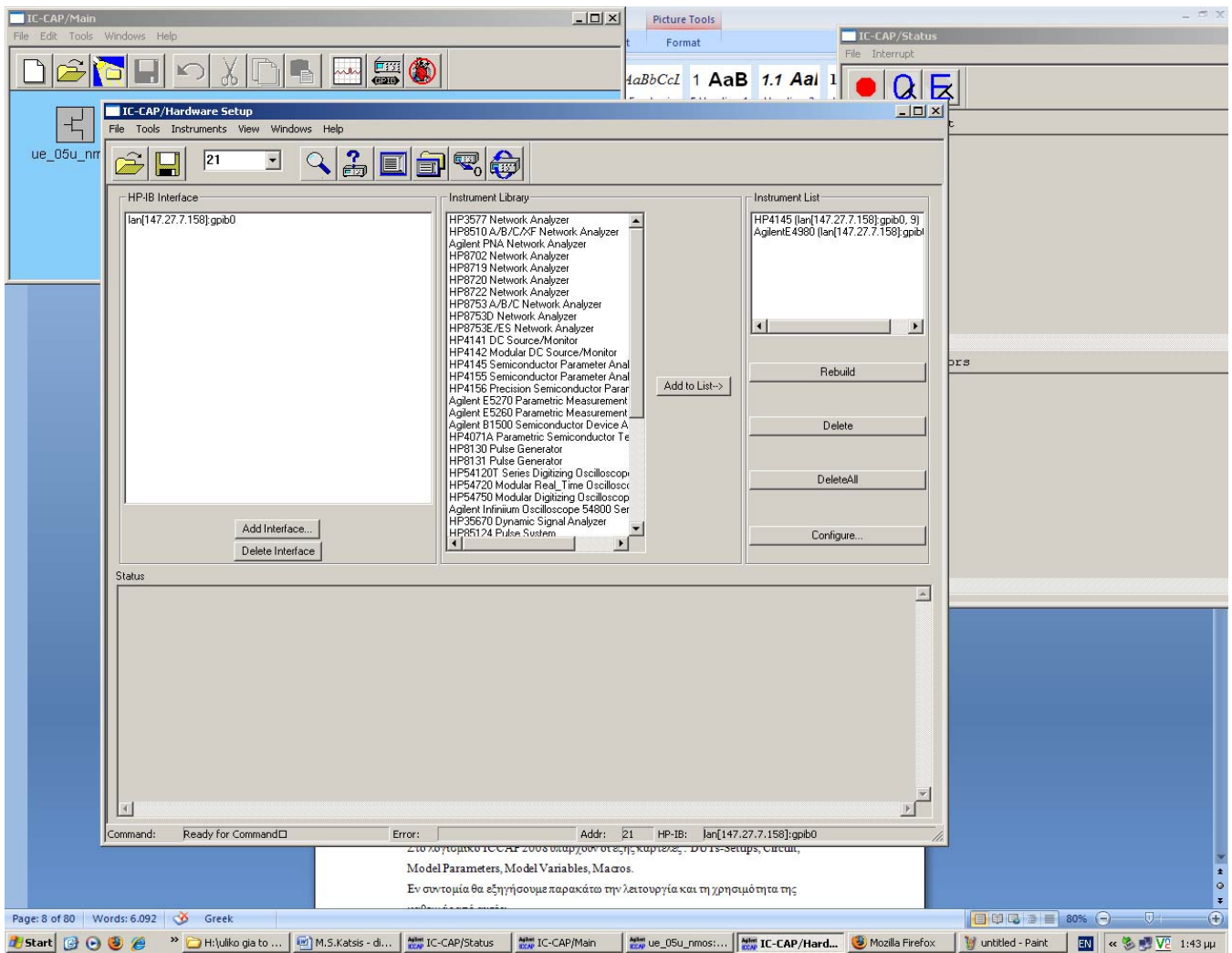
Σχ. 2.5. E4980A Precision LCR Meter

2.4 Λογισμικό εργαστηρίου Agilent ICCAP 2006B

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο και έγινε η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας είναι το Agilent ICCAP 2006B. Χρησιμοποιείται για να θέσουμε τις τάσεις που επιθυμούμε στους ακροδέκτες Drain, Gate, Source, Bulk του τρανζίστορ, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων και εν συνεχεία να εμφανίσουμε τις γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων και των διαγωγιμοτήτων και που θα αποτελέσουν την εξαγωγή των παραμέτρων της τεχνολογίας που μελετάμε.

2.4.1 Εισαγωγή στο λογισμικό Agilent ICCAP 2006B

Πρώτο πράγμα που απαιτείται να γίνει εφεξής είναι να αναγνωριστεί ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο. Ρυθμίζουμε το hardware setup ούτως ώστε να αναγνωριστούν από το λογισμικό ότι ο αναλυτής παραμέτρων και ο μετρητής LCR είναι συνδεδεμένοι με τον υπολογιστή.



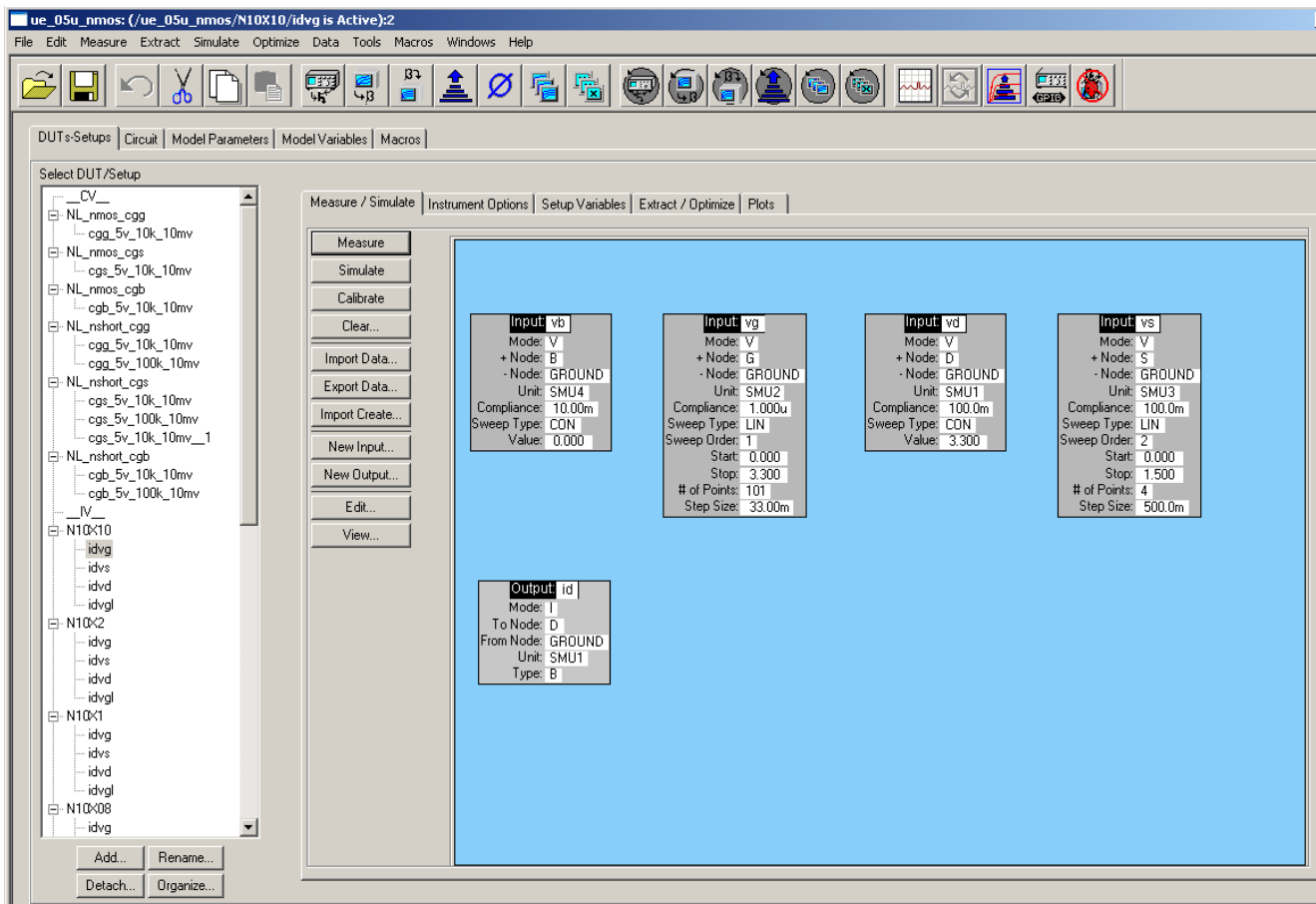
Σχ. 2.6. Hardware setup για την αναγνώριση του αναλυτή παραμέτρων και του LCR meter

Στο λογισμικό ICCAP 2008 υπάρχουν οι εξής καρτέλες : DUTs-Setups, Circuit, Model Parameters, Model Variables, Macros.

Εν συντομία θα εξηγήσουμε παρακάτω την λειτουργία και τη χρησιμότητα της καθεμιάς από αυτές:

- **DUTs-Setups**

Στην καρτέλα DUTs-Setups, δημιουργούμε τα DUT και τα setup τους, όπου θα καθοριστούν οι τάσεις που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Παρατίθεται παρακάτω ένα ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής τάσεων σε ένα setup Id-Vg για Nmos τρανζίστορ :



Σχ. 2.7. Εφαρμογή τάσεων μέσω του λογισμικού ICCAP

Αριστερά δημιουργούμε τα DUT's. Δίνουμε χαρακτηριστικά ονόματα στα DUT, ούτως ώστε να αναγνωρίζουμε τα *μήκη* (L) και τα *πλάτη* (W) του καναλιού του τρανζίστορ. Σε κάθε DUT, δημιουργούμε κάποια setup όπως το idvg, idvd, idvs και idvgl για τη λειτουργία του τρανζίστορ στη γραμμική του περιοχή.

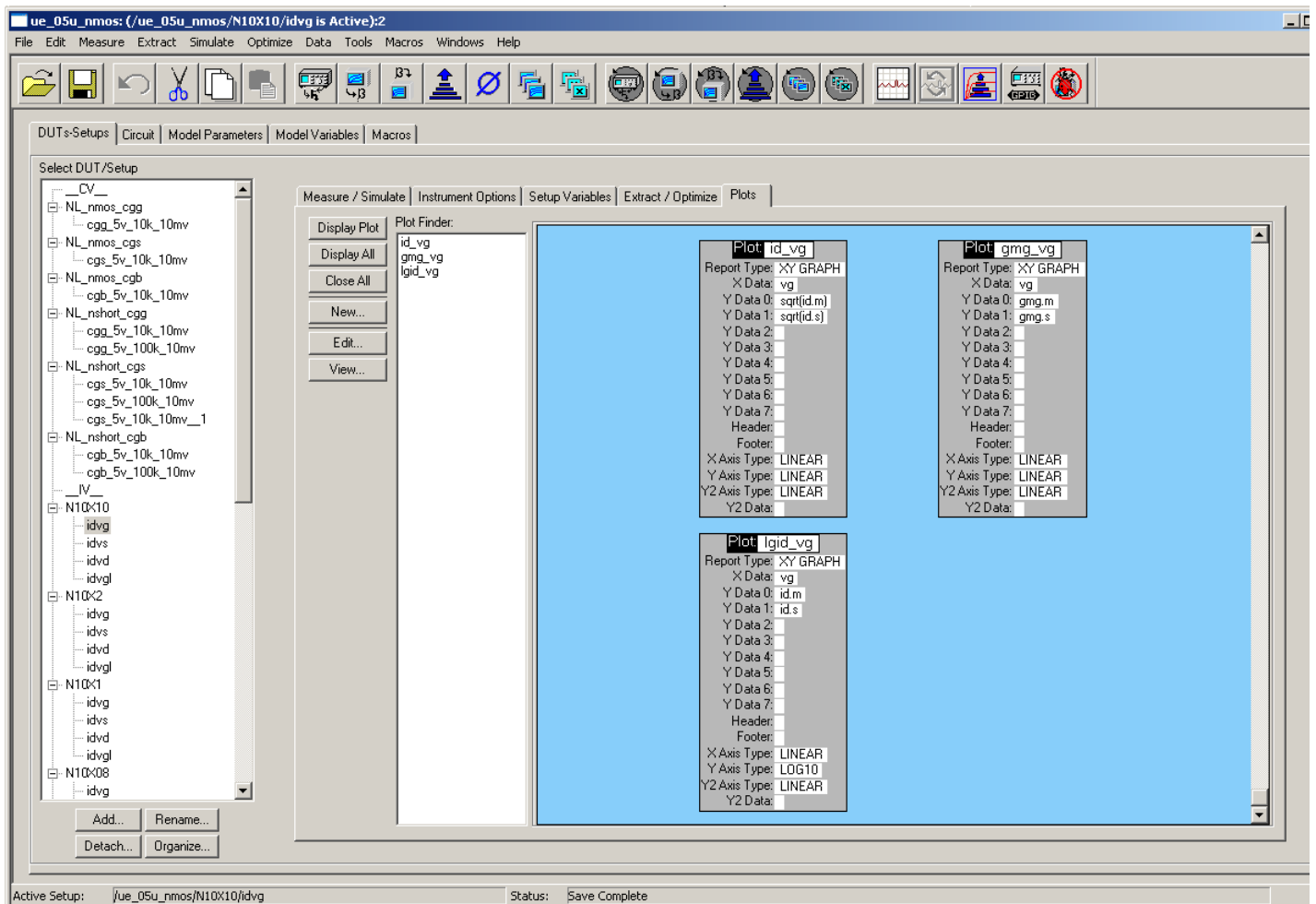
Δεξιά, φαίνεται το setup των τάσεων που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε. Για παράδειγμα, ας αναλύσουμε την τάση που εφαρμόζεται ως είσοδος στο Gate (V_g)θα δούμε ότι:

- είναι τάση που εφαρμόζεται από τον κόμβο Gate στο ground.
- Αντιστοιχίζεται με την έξοδο $SMU2$ του αναλυτή παραμέτρων.
- Το compliance αναφέρεται ως το ανώτερο σημείο που μπορεί να φτάσει το ρεύμα στον κόμβο αυτόν.
- Το sweep type αναφέρει αν η τάση, που εφαρμόζεται ως είσοδος, μεταβάλλεται γραμμικά (LIN) ή αν θα παραμένει σταθερή (CON). Αν η τάση μεταβάλλεται γραμμικά πρέπει να εισάγουμε από ποια τιμή θα ξεκινήσει και

σε ποια τιμή θα σταματήσει να εφαρμόζεται η αντίστοιχη τάση και πόσα σημεία θα χρησιμοποιούνται για να γίνει η γραμμική μεταβολή. Αν η τάση είναι σταθερή, θα πρέπει να εφαρμοστεί σταθερή τιμή τάσης.

- Ως έξοδο, επιλέγουμε ποιο ρεύμα επιθυμούμε να δούμε στις γραφικές παραστάσεις που θα δημιουργηθούν.

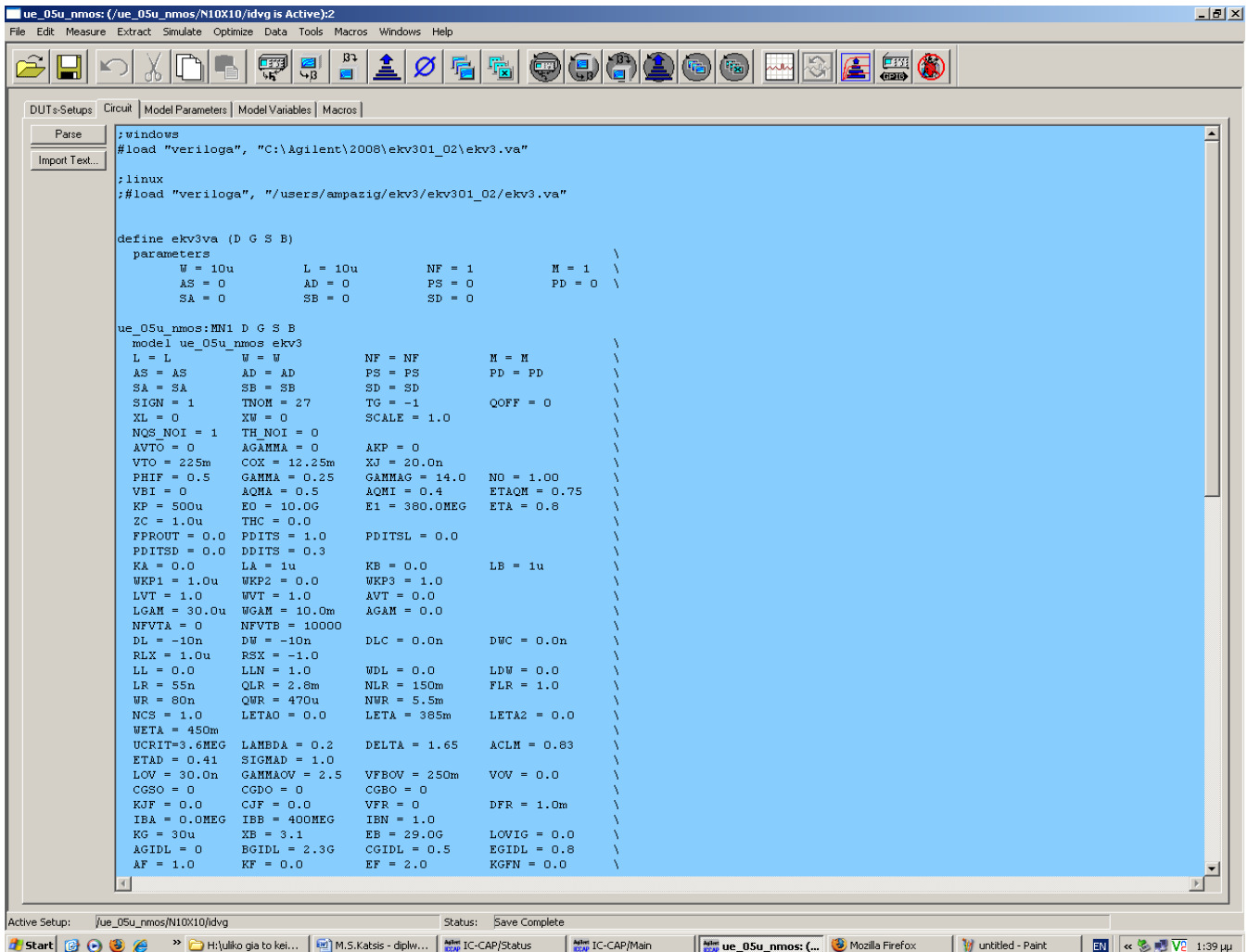
Στο ίδιο Setup αλλά στην καρτέλα Plots θα καθορίσουμε τις γραφικές παραστάσεις που θέλουμε να προβάλλουμε. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, οι γραφικές παραστάσεις που μας ενδιαφέρουν να δούμε είναι οι γραφικές των ρευμάτων σε weak και σε strong inversion καθώς και οι διαγωγιμότητες των ρευμάτων αυτών.



Σχ. 2.8. Δημιουργία γραφικών παραστάσεων

- **Circuit**

Στην καρτέλα Circuit του λογισμικού φορτώνουμε τον Verilog-A κώδικα, ο οποίος περιγράφει πλήρως το EKV301.02 μοντέλο. Παράλληλα προσθέτουμε και τις παραμέτρους, που βρίσκονται ήδη στον .va κώδικα.



Σχ. 2.9. Προσθήκη .va κώδικα – Προσθήκη παραμέτρων

- **Model Parameters**

Οι παράμετροι αυτές που προσθέτουμε, θα είναι αυτές των οποίων τις τιμές πρέπει να εξάγουμε έτσι ώστε η θεωρητική προσέγγιση που θα παράγεται από τις εξισώσεις του μοντέλου EKV301.02 να συμπίπτουν με τις γραφικές παραστάσεις που παράγονται από τη διαδικασία των εργαστηριακών μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε. Η λίστα των παραμέτρων που βρίσκονται στο Verilog-A κώδικα, αφού τις εισάγουμε στην καρτέλα Circuit, θα φαίνονται και στην καρτέλα Model Parameters.

Param Name	Min	Opt Min	Value	Opt Max	Max	Memory Stored
ue_05u_nmos.SIGN			1.000			1.000
ue_05u_nmos.TNOH			27.00			27.00
ue_05u_nmos.TG			-1.000			-1.000
ue_05u_nmos.QOFF			0.000			0.000
ue_05u_nmos.XL			0.000			0.000
ue_05u_nmos.XW			0.000			0.000
ue_05u_nmos.SCALE			1.000			1.000
ue_05u_nmos.NQS_NOI			1.000			1.000
ue_05u_nmos.TH_NOI			0.000			0.000
ue_05u_nmos.AVTO			0.000			0.000
ue_05u_nmos.AGAMMA			0.000			0.000
ue_05u_nmos.AKP			0.000			0.000
ue_05u_nmos.VTO		100.0m	520.0m	800.0m		225.0m
ue_05u_nmos.COX		1.000m	4.000m	20.00m		12.25m
ue_05u_nmos.XJ			20.00n			20.00n
ue_05u_nmos.PHIF		350.0m	450.0m	700.0m		500.0m
ue_05u_nmos.GAMMA		100.0m	730.0m	800.0m		250.0m
ue_05u_nmos.GAMMAG		5.000	10.50	25.00		14.00
ue_05u_nmos.NO		1.000	910.0m	1.100		1.000
ue_05u_nmos.VBI			0.000			0.000
ue_05u_nmos.AQMA			900.0m			500.0m
ue_05u_nmos.AQMI			400.0m			400.0m
ue_05u_nmos.ETALQM			9.000			750.0m
ue_05u_nmos.KP		100.0u	180.0u	1.000m		500.0u
ue_05u_nmos.EO		10.00MEG	350.0MEG	10.00G		10.00G
ue_05u_nmos.E1		10.00MEG	320.0MEG	10.00G		380.0MEG
ue_05u_nmos.ETA		400.0m	860.0m	1.000		800.0m
ue_05u_nmos.ZC			1.000u			1.000u
ue_05u_nmos.THC			0.000			0.000
ue_05u_nmos.FPROUT			1.000MEG			0.000
ue_05u_nmos.PDITS			0.000			1.000
ue_05u_nmos.PDITSL			0.000			0.000
ue_05u_nmos.PDITSD			1.000			0.000
ue_05u_nmos.DDITS			300.0m			300.0m
ue_05u_nmos.KA		-1.000	0.000	1.000		0.000
ue_05u_nmos.LA		1.000n	1.000u	500.0n		1.000u
ue_05u_nmos.KB		-1.000	0.000	1.000		0.000
ue_05u_nmos.LB		100.0n	1.000u	2.000u		1.000u
ue_05u_nmos.WKP1			1.000u			1.000u
ue_05u_nmos.WKP2			0.000			0.000

Σχ. 2.10. Λίστα παραμέτρων μοντέλου προς εξαγωγή

- **Model Variables**

Στην καρτέλα Model Variables του λογισμικού, μπορούν να προστεθούν κάποιες μεταβλητές και οι τιμές που ισούνται η κάθε μία. Έτσι, μας δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούμε τις τιμές που επιθυμούμε αν αυτές είναι ίσες με τα ονόματα των μεταβλητών που προσθέσαμε στην λίστα αυτή. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, αλλά και στην διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων, δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου μεταβλητές του μοντέλου (Model Variables).

- **Macros**

Τέλος, στην καρτέλα Macros γράφονται οι μακροεντολές, οι οποίες καλούν κάποιες εντολές και λειτουργίες του λογισμικού. Επίσης, είναι εκείνες που καλούν τα κατάλληλα optimizations, και τα οποία διαμορφώνονται κατάλληλα έτσι ώστε να παραχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Στην εργασία αυτή δεν χρησιμοποιήθηκαν μακροεντολές καθώς η σκοπιά και το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας δεν απαιτεί κάτι τέτοιο.

3 Το compact Μοντέλο EKV3

Στη διπλωματική εργασία αυτή εργαστήκαμε με το μοντέλο EKV3 Compact Model στην MOSFET τεχνολογία των 0.5um. Η τελευταία έκδοση πάνω στην οποία εργαστήκαμε είναι το EKV301.02 Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ότι πιο σύγχρονο στη σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων καθώς προσφέρει στο σχεδιαστή μεγάλη ευελιξία. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την ομαλή και συνεχή λειτουργία των τρανζίστορ από την ασθενή μέχρι και την ισχυρή αναστροφή περιλαμβάνοντας και τη μέτρια αναστροφή, σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα που επέτρεπαν τη λειτουργία των τρανζίστορ μόνο στην ισχυρή αναστροφή. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στο μοντέλο EKV3, καθώς και μια πλήρης ανάλυση του με την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του αλλά και των πλεονεκτημάτων του μοντέλου αυτού.

3.1 Ιστορική Αναδρομή

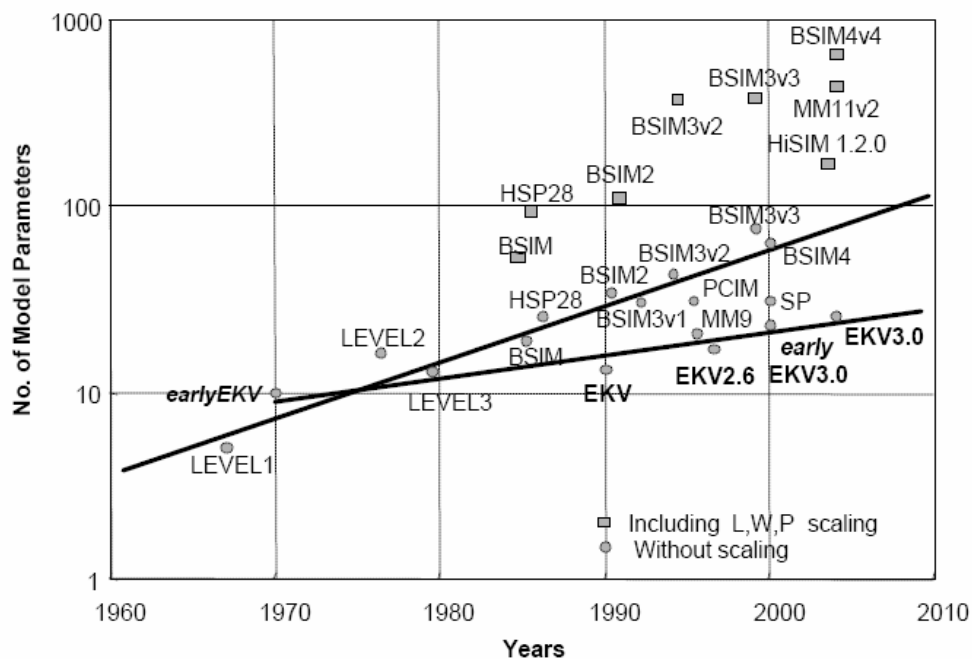
Το μοντέλο EKV3 πρωτοξεκίνησε να εφαρμόζεται κατά τη δεκαετία του 1970 με τους επιστήμονες να προσπαθούν να σχεδιάσουν ένα συμμετρικό μοντέλο που θα πρόσφερε γραμμική λειτουργία τόσο σε ασθενή όσο και σε μέτρια αλλά και σε ισχυρή αναστροφή. Η πρώτη και η πιο απλή μορφή του μοντέλου EKV παρουσιάστηκε το 1995 με την ονομασία EKV2.3 ενώ 2 χρόνια μετά παρουσιάζεται στο Πολυτεχνείο της Λοζάννης το EKV2.6 στις αρχές λειτουργίας του οποίου βασίζεται και το σημερινό EKV301.02 με το οποίο πραγματοποιήθηκε η εργασία αυτή.

3.2 Αρχές λειτουργίας του μοντέλου EKV3

Η σχεδίαση αναλογικών CMOS κυκλωμάτων απαιτεί ένα μοντέλο το οποίο να είναι βασισμένο στη Φυσική, να έχει όσο το δυνατόν λιγότερες παραμέτρους(βλ. σχήμα 3.2.1) και να ισχύει για όλο το φάσμα λειτουργίας του MOSFET.

Πρέπει δηλαδή η λειτουργία του να διέπεται από απλές και ταυτόχρονα αναλυτικές εξισώσεις που να περιγράφουν αναλυτικά τη συμπεριφορά του μοντέλου σε ασθενή, μέτρια και ισχυρή αναστροφή και να καλύπτουν πολλά από τα φαινόμενα τα οποία παρουσιάζονται στη λειτουργία των MOSFET τρανζίστορ.

Έτσι, από τα πρώτα κιάλια στάδια εφαρμογής του μοντέλου EKV3, εισήχθησαν κανονικοποιημένες μορφές για το ρεύμα αλλά και για τις τάσεις στα τρανζίστορ.[1] Στις πρώτες του εκδόσεις, το μοντέλο είχε προσομοιώσει την περιοχή της μέτριας αναστροφής, χρησιμοποιώντας μια εμπειρική σχέση ρεύματος-τάσης [2]. Το μοντέλο αυτό είναι βασισμένο στην ανάλυση φορτίου και χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση αναλογικών αλλά και RF (Radio-Frequency)κυκλωμάτων.



Σχ. 3.2.1. Αριθμός παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου

Σημειώνεται ότι το μοντέλο EKV3, σε όλες του τις εκδόσεις, υπάρχει διαθέσιμο σε μορφή Verilog-A κώδικα. Η έκδοση του μοντέλου με την οποία πραγματοποιήθηκε η εργασία αυτή είναι η **EKV301.02**

3.2.1 Ορισμός βασικών μεγεθών του EKV3

Παρακάτω ορίζονται τα βασικά μεγέθη του μοντέλου [2] :

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

Η χωρητικότητα οξειδίου C'_{OX} δίνεται από τον τύπο : $C'_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}}$

- Δυναμικό επαφής V_{FB} [V] που δίνεται από την εξίσωση : $V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q'_{OX}}{C'_{OX}}$

- Θερμοδυναμική τάση U_T [V] : $U_T = \frac{kT}{q}$, με q το φορτίο του ηλεκτρονίου, k

τη σταθερά Boltzmann

- Δείκτης σώματος γ [$\text{V}^{-1/2}$] : $\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{SI}N_{SUB}}}{C'_{OX}}$

- Δυναμικό quasi-Fermi Φ_F [V] : $\Phi_F = U_T \ln\left(\frac{N_{SUB}}{n_i}\right)$, με κατ' όγκο

συγκέντρωση ηλεκτρονίων n_i ατόμων νόθευσης N_{SUB}

- 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 $V_G - V_{FB} = \Psi_s + \gamma \sqrt{\Psi_s} - \frac{Q'_i}{C'_{OX}}$

- Δυναμικό επιφάνειας pinch-off $\Psi_{SP} : \Psi_{SP} = \Psi_s ||Q'_i| >> |Q'_b| = V_G - V_{FB} -$

$$\gamma \left(\sqrt{V_G - V_{FB} + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2} \right)$$

- Δυναμικό 'pinch-off' : $V_P = \Psi_{SP} - \Psi_0$

- Κλίση n : $n = \left[\frac{\partial \Psi_{SP}}{\partial V_G} \right]^{-1} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\Psi_{SP}}} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\Psi_0 + V_P}}$

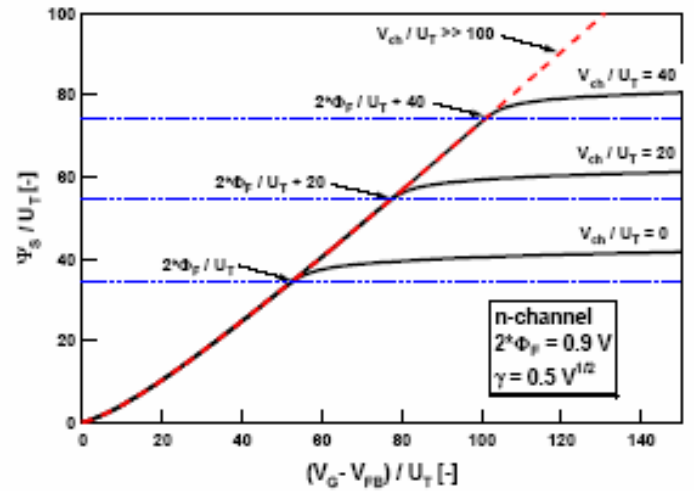
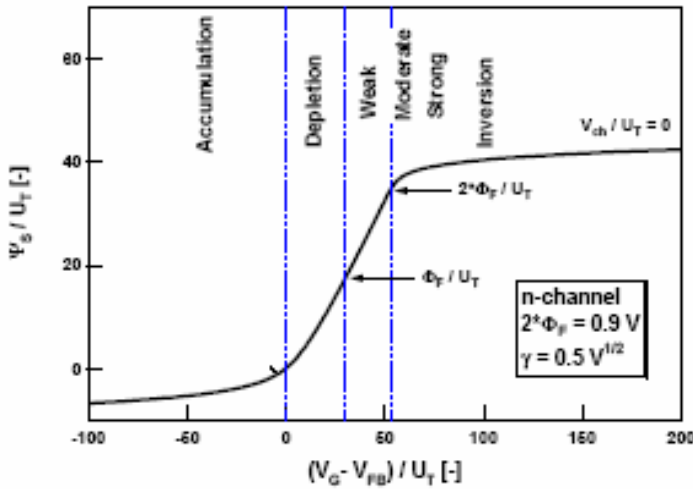
- Τάση κατωφλίου V_{TO} [V] (threshold voltage) : $V_{TO} = V_{FB} + \Psi_0 + \gamma\sqrt{\Psi_0}$

Από τα παραπάνω, προκύπτει : $V_P = V'_G - \Psi_0 - \gamma \left(\sqrt{V'_G + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2} \right)$

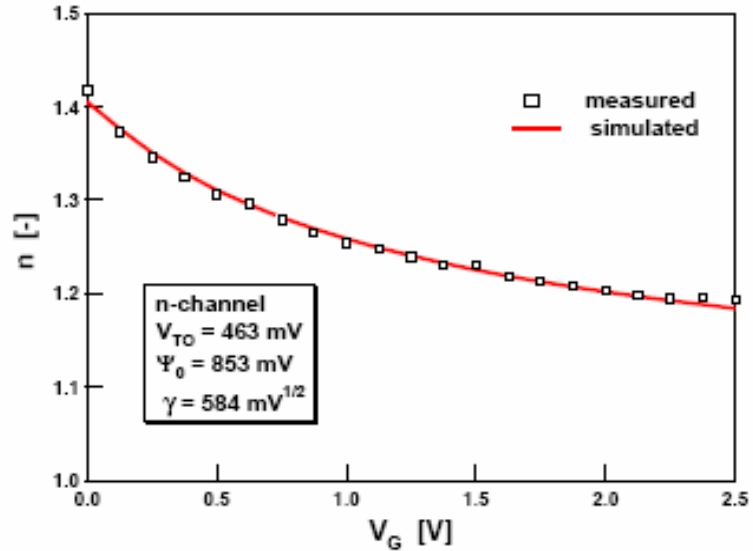
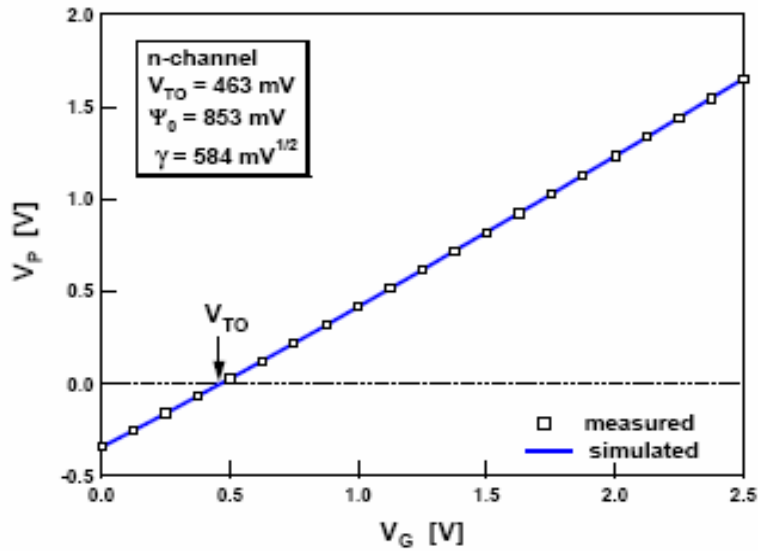
και

$$V'_G = V_G - V_{FB} = V_G - V_{TO} + \Psi_0 + \gamma\sqrt{\Psi_0}.$$

Μια πολύ χρήσιμη προσέγγιση της V_P είναι : $V_P \cong \frac{V_G - V_{TO}}{n}$



Σχ3.2.1.1. Λειτουργία του MOSFET ανάλογα με $V_G, V_{FB}, \Phi_F, V_{CH}$



Σχ. 3.2.1.2. $V_P - V_G$, $n - V_G$

3.2.2 Ρεύμα καναλιού

Το ρεύμα στο κανάλι δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

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

Προσέγγιση: γραμμική σχέση $Q'_i - \Psi_s$

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

Και συνδέοντας τα παραπάνω έχουμε ότι :

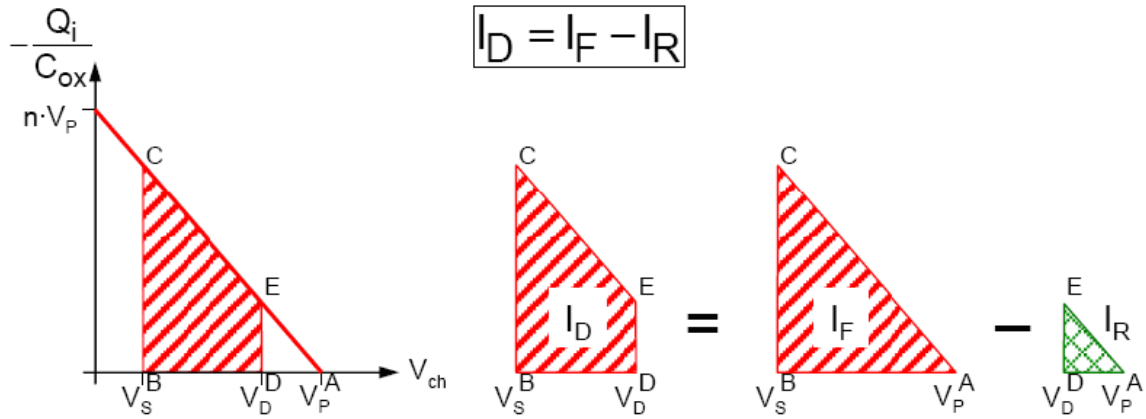
$$I_D|_x = \mu W \cdot \left[-\frac{Q'_i(x)}{n \cdot C'_{ox}} + U_T \right] \frac{\partial Q'_i}{\partial x}$$

Αν τώρα ολοκληρώσουμε ως προς όλο το κανάλι και θεωρώντας ότι το ρεύμα I_D παραμένει σταθερό σε όλο το κανάλι, έχουμε :

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

$$= I_F - I_R$$

με I_F και I_R τα ρεύματα forward και reverse αντίστοιχα.



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

Για μεγαλύτερη ευκολία στην ανάλυση του μοντέλου αλλά και για ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στη λειτουργία του, μας βολεύει να προχωρήσουμε στην κανονικοποίηση των ρευμάτων Forward και Reverse.

Έχουμε λοιπόν:

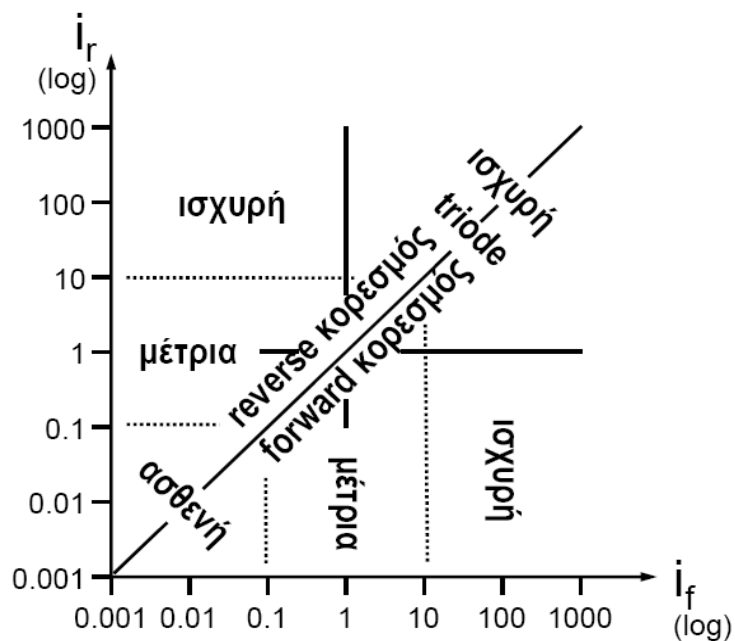
$$I_D = I_{SPEC} (i_f - i_r) \quad \text{με } I_{SPEC} = 2n\beta U_T^2, \quad \beta = \mu_n \frac{C_{ox} W}{L} \text{ και } U_T = \frac{kT}{q}$$

Το ρεύμα καναλιού εξαρτάται μόνο από τα φορτία αναστροφής στο source q_S και στο drain q_D .

$$i_f = \frac{I_F}{I_{SPEC}} = q_S^2 + q_S \quad \text{και} \quad i_r = \frac{I_R}{I_{SPEC}} = q_D^2 + q_D$$

Τα φορτία q_S και q_D δίνονται από τις εξισώσεις :

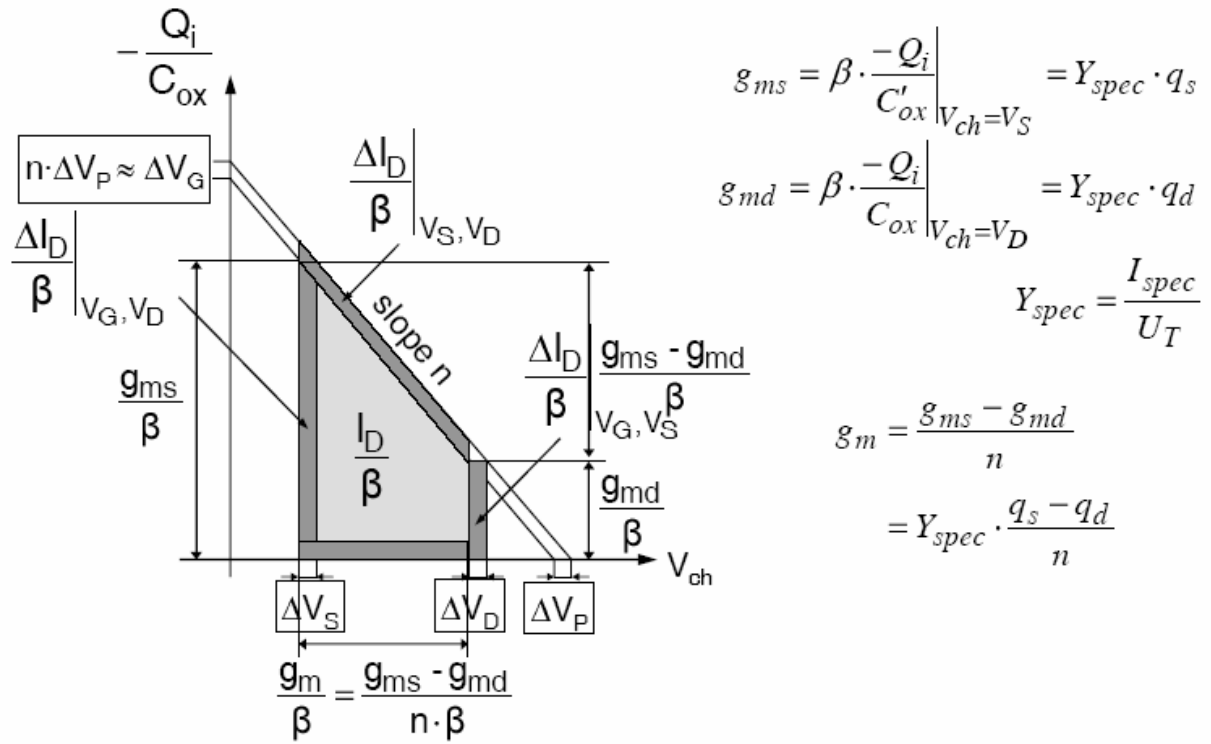
$$q_S = \frac{Q_{iS}}{Q_{SPEC}}, q_D = \frac{Q_{iD}}{Q_{SPEC}} \text{ με } qi = \frac{Q_i}{Q_{SPEC}} \text{ και } Q_{SPEC} = -2n C_{OX} U_T$$



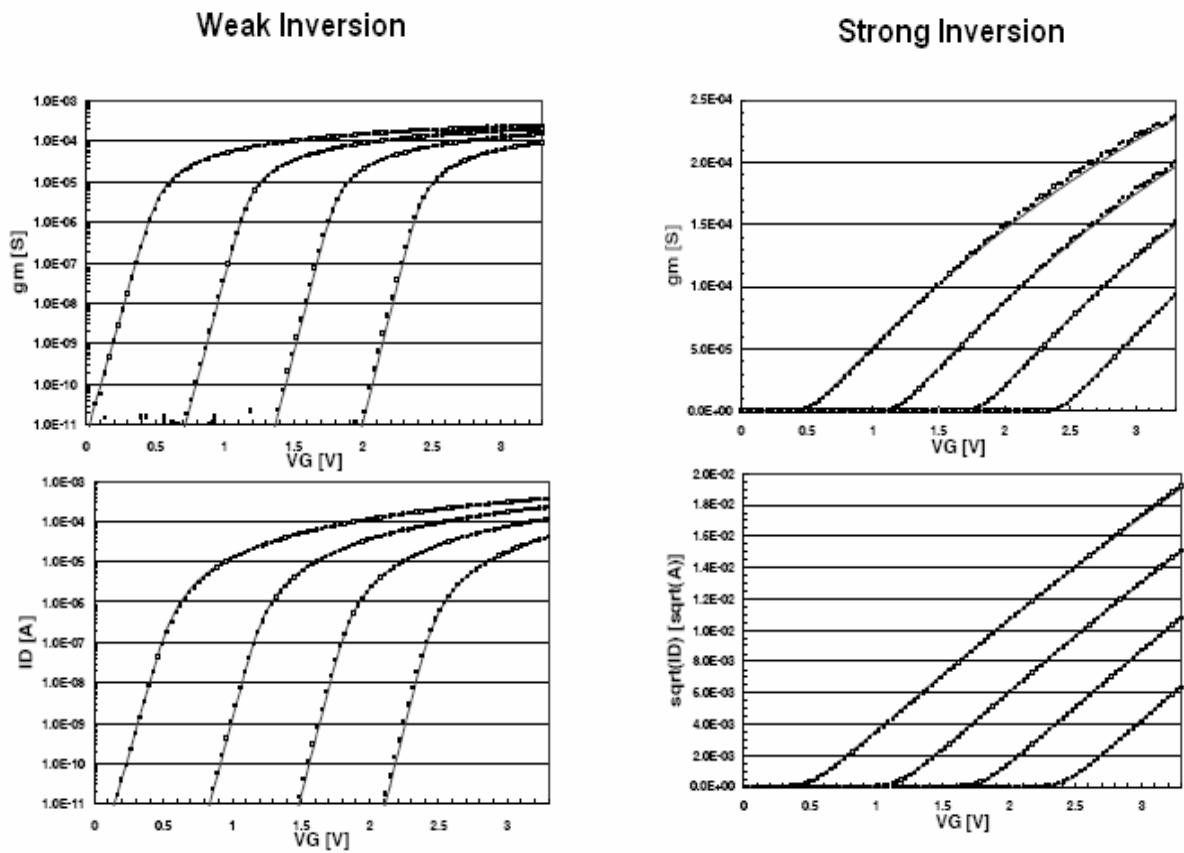
Σχ. 3.2.2.1 Επίπεδα αναστροφής του MOS τρανζίστορ (vs. I_f και I_r)

3.2.3 Διαγωγιμότητες και φορτία

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως ορίζονται οι διαγωγιμότητες του τρανζίστορ ενώ ακολουθούν κάποια γραφήματα που δείχνουν τη λειτουργία του τρανζίστορ τόσο σε ασθενή όσο και σε ισχυρή αντιστροφή.

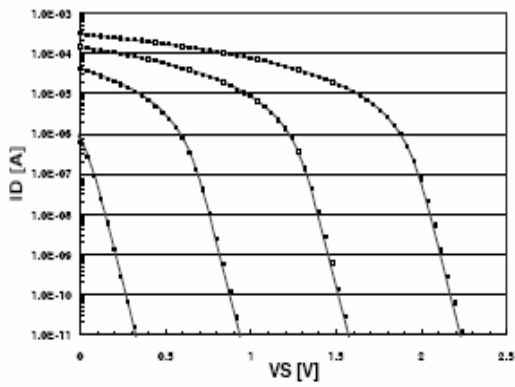
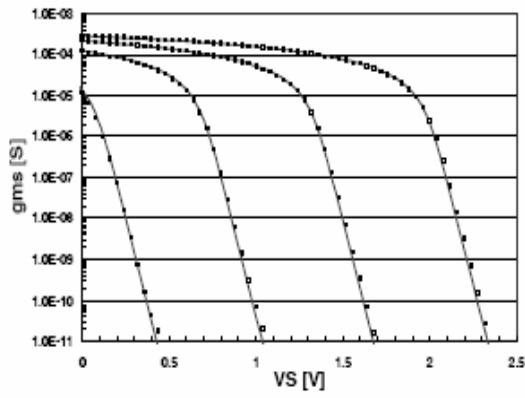


Σχ3.2.2.2 Ορισμός των διαγωγιμοτήτων του τρανζίστορ

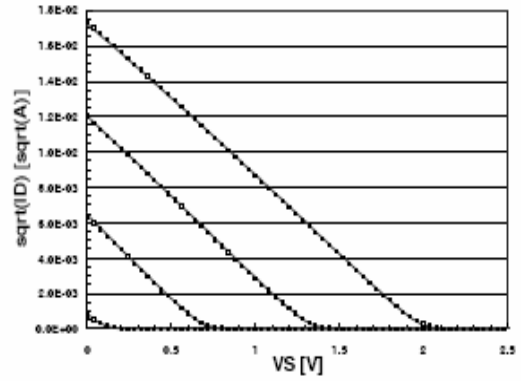
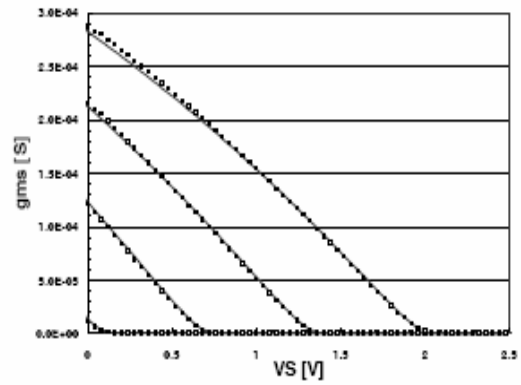


Σχ. 3.2.3.1 G_m, I_d vs. V_G

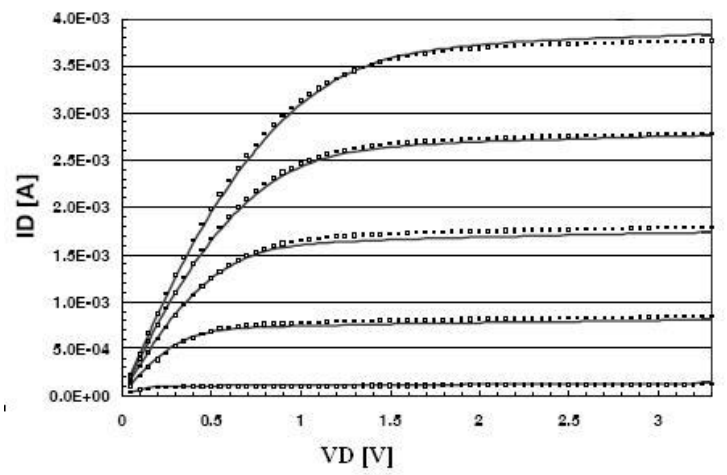
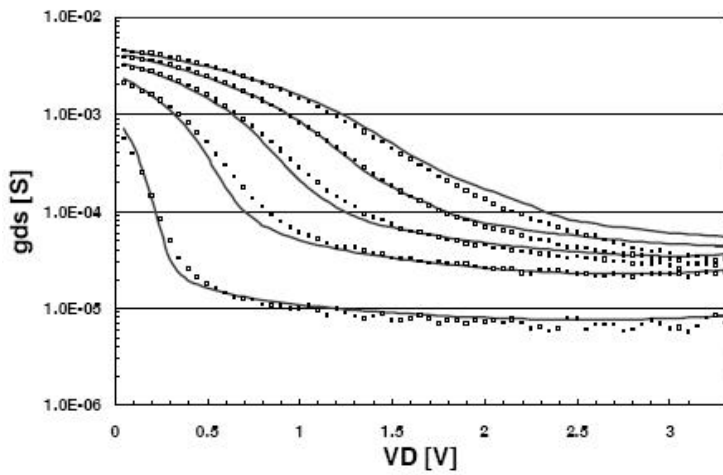
Weak Inversion



Strong Inversion



Σχ. 3.2.3.3 Gms, Id vs. VS

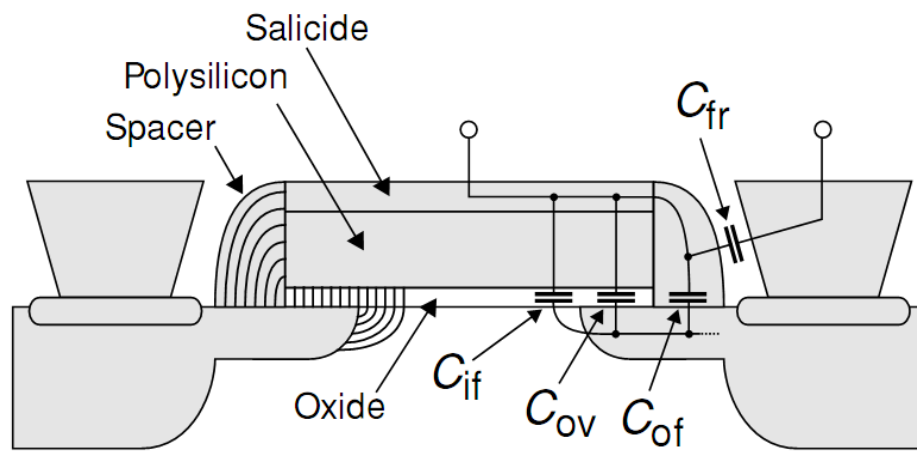


Σχ. 3.2.3.2 Gds, Id vs. VD

3.2.4 Οι Χωρητικότητες στο EKV3 μοντέλο

Στο σχήμα 4.2.4.1 φαίνονται οι διαφορετικές χωρητικότητες Gate-Source και Gate-Drain που ορίζουν το εξωτερικό μέρος του τρανζίστορ. Υπάρχουν κυρίως 3 χωρητικότητες: α) η overlap χωρητικότητα C_{ov} , β) η inner-fringing field χωρητικότητα C_{if} και γ) η outer-fringing χωρητικότητα C_{of} .

$$C_{GS(D)o} = C_{ov}(V_G, V_{S,(D)}) + C_{if}(V_G, V_{S,(D)}) + C_{of}. \quad [8]$$



Σχ.4.2.4.1 Οι χωρητικότητες στο extrinsic part του MOSFET

Στο MOS τρανζίστορ, οι σημαντικές χωρητικότητες μπορούν να εκφραστούν σαν συναρτήσεις του φαινομένου αναστροφής σε σχέση με τα Source και Drain. Ή εναλλακτικά, ως συναρτήσεις των μεταβλητών

$$\chi_{f(r)} = q_{s(d)} + 1/2 = \sqrt{1/4 + i_{f(r)}} + 1/2 \quad [6]$$

Για τις χωρητικότητες του καναλιού ισχύει ότι :

- $C_{gs} = \left(\frac{2WL_{eff}C_{ox}}{3} \right) \left(1 - \frac{0.5x_f + x_r + x_r^2}{(x_f + x_r)^2} \right) + C_{ov}$
- $C_{gd} = \left(\frac{2WL_{eff}C_{ox}}{3} \right) \left(1 - \frac{x_f^2 + x_f + 0.5x_r}{(x_f + x_r)^2} \right) + C_{ov}$

- $C_{gb} = \frac{n-1}{n} \cdot [W \cdot L_{eff} \cdot C'_{ox} + C_{gs} + C_{gd}]$

Ακριβέστερα, η overlap χωρητικότητα είναι bias-dependent [7] και δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

- $C_{ov} = L_{ov} C_{ox} W$, όπου L_{ov} είναι το L_{DD} μήκος του overlap,

και $x_r = 0.5$, $x_f = \sqrt{0.25 + IC}$ και L_{eff} το αποτελεσματικό μήκος καναλιού το οποίο ισούται με:

$$L_{eff} = L + DL + DLC$$

όπου L μήκος καναλιού και DL και DLC κάποιες παράμετροι του μοντέλου [3].

Τελικά η ολική χωρητικότητα της πύλης (Gate) θα δίνεται από τον τύπο:

$$C_{GG} = C_{GS} + C_{GD} + C_{GB} + 2C_{OV}$$

3.2.5 Η Θερμοκρασία στο EKV3 μοντέλο

Αρκετές είναι οι βασικές παράμετροι του μοντέλου οι οποίες επηρεάζονται σημαντικά από την θερμοκρασία, όπως η τάση κατωφλίου (V_{TO}), η παράμετρος $PHIF$, αλλά και άλλες, οπότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν αυτή η βασική παράμετρος.

	U_T	n_i	N_b	$\epsilon_{ox}, \epsilon_{si}$	Q_{fc}	Φ_{ms}	t_{ox}	L, W	μ
Temperature	Y	Y	N	Ne	N	Y	N	N	Y
Mismatch	N	N	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y

Y = yes, N = no, Ne = negligible

Σχ.3.2.5.1 Βασικές φυσικές παράμετροι και η επιρροή της θερμοκρασίας σε αυτές

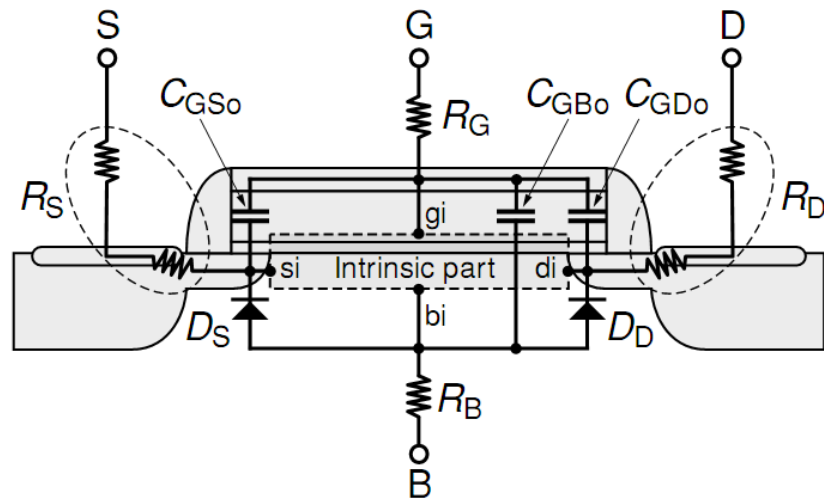
	Φ_F	C_{ox}	V_{FB}	Γ_b	ψ_0	$n _V$	V_{TO}	β	Q_{spec}	I_{spec}
Defin.	3.8	3.20	3.22	3.30	3.66	3.34	3.58	4.8	3.42	4.14
Temp.	Y	Ne	Y	Ne	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Match	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Y = yes, N = no, Ne = negligible

Σχ.3.2.5.2 Ενδιάμεσες παράμετροι και παράμετροι του μοντέλου και η επιρροή της θερμοκρασίας σε αυτές

3.2.6 Οι Δίοδοι στο μοντέλο EKV3

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι επαφές στο extrinsic part του MOSFET.



Σχ.3.2.6.1 Το extrinsic μέρος του MOSFET τρανζίστορ με τις τις διόδους Source-Bulk και Drain-Bulk, αλλά και τις χωρητικότητες Gate-Source, Gate-Bulk

Οι χωρητικότητες των διόδων C_{BSj} και C_{DSj} στα Source και Drain αντίστοιχα μπορούν απλά να μοντελοποιηθούν σαν ένας πυκνωτής με πυρίτιο σαν διηλεκτρικό και χωρισμένος σε απόσταση d ,

$$C_j = \frac{\epsilon_{si}}{d},$$

Όπου C_j είναι η χωρητικότητα ανα μονάδα επιφανείας.

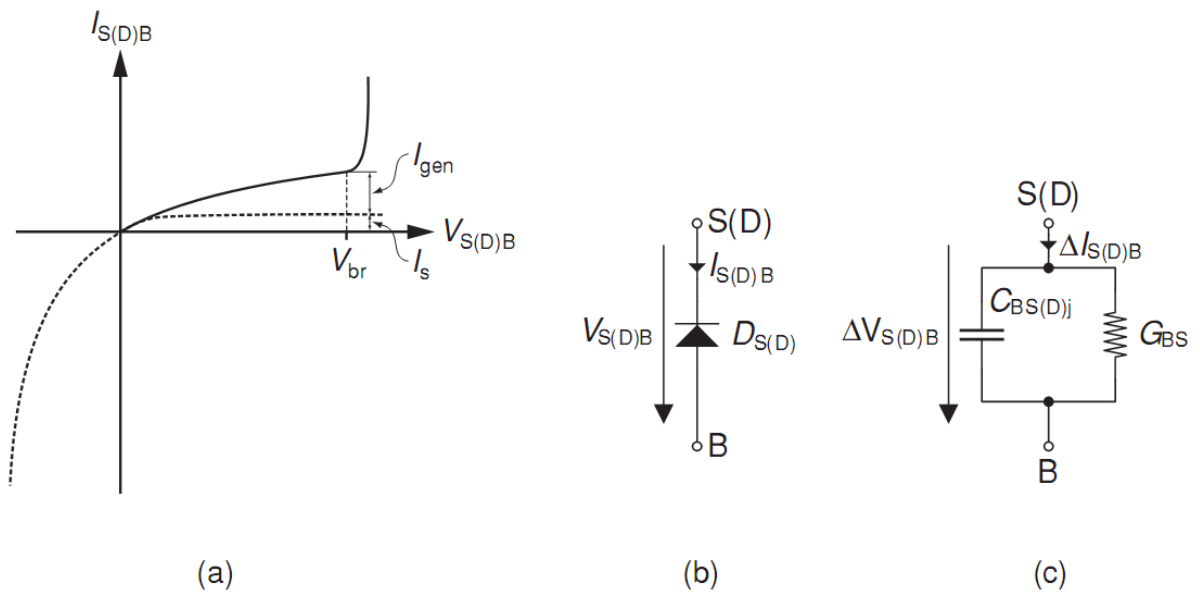
Ο τύπος ο οποίος δίνει τη χωρητικότητα της διόδου Source-Bulk και Drain-Bulk είναι:

$$C_{BS(D)j} = A_{S(D)} C_{jbw} + (P_{S(D)} - W_{eff}) C_{jsw} + W C_{jswg} \quad [8]$$

Όπου :

- ο C_{jbw} είναι η bottom-wall χωρητικότητα ανα μονάδα επιφανείας,
- ο C_{jsw} είναι η side-wall χωρητικότητα ανα μονάδα μήκους της περιμέτρου των απομονωμένων πλευρών,
- ο C_{jswg} είναι η side-wall χωρητικότητα κατά μήκος της πύλης (Gate),
- ο A_s, A_d είναι η συνολική περιοχή διάχυσης στο source και drain αντίστοιχα,
- ο P_s, P_d είναι η περίμετρος της συνολικής περιοχής διάχυσης στο source και drain αντίστοιχα και
- ο W είναι το πλάτος του τρανζίστορ.

το σχήμα 3.2.6.2 δίνεται η μοντελοποίηση της λειτουργίας των διόδων στα Source και Drain.



Σχ.3.2.6.2 Η λειτουργία των διόδων στα Source και Drain μέρη του Mosfet: a) η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος b) το μοντέλο μεγάλου σήματος c) το ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος

3.2.7 Μη ιδανικά φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση του MOSFET

Υπάρχουν κάποια φαινόμενα, τα οποία είναι μη ιδανικά με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση του MOSFET τρανζίστορ.

Τα δύο κυριότερα φαινόμενα που περιορίζουν την κινητικότητα των ηλεκτρονίων (και των *οπών* για τα *PMOS*) είναι:

- a) Το κάθετο πεδίο λόγω **scattering**. Η κινητικότητα των ηλεκτρονίων περιορίζεται όταν το κάθετο πεδίο είναι είτε πολύ μεγάλο είτε πολύ μικρό(ιδιαίτερα με υψηλό N_{sub} , χαμηλή θερμοκρασία). Οι συνθήκες αυτές συμβάλλουν στην σημαντική αύξηση των συγκρούσεων των ηλεκτρονίων(ή οπών αντίστοιχα) με τον κρύσταλλο, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η κινητικότητά τους.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού από το EKV3, γίνεται με την εισαγωγή των παραμέτρων KP , $E0$, $E1$, ETA , ZC , THC .

- b) Το οριζόντιο πεδίο λόγω περιορισμού της ταχύτητας **Velocity Saturation**. Αυτό αποτελεί την κύρια αιτία περιορισμού του ρεύματος ιδιαίτερα για τρανζίστορ μικρού μήκους και εμφανίζεται κυρίως στα NMOS. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, στο EKV3 έχει προστεθεί η παράμετρος $UCRIT$.

Άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν την απόδοση του MOSFET τρανζίστορ είναι:

- a) Φαινόμενο Διαμόρφωσης μήκους καναλιού L (**Channel Length Modulation**). Βασικό του χαρακτηριστικό είναι ότι αυξάνει (επιδεινώνει) την αγωγιμότητα εξόδου του τρανζίστορ σε περιοχή κορεσμού (strong inversion). Επίσης συνδέεται τόσο με το velocity saturation όσο και με το 2D πεδίο κοντά στο drain. Όσο πιο μικρή τιμή είναι αυτή του L , τόσο πιο έντονα εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του Channel length modulation, έχουν εισαχθεί οι παράμετροι $LAMBDA$, $DELTA$.

- b) Αλλαγή του φαινομένου σώματος (**Charge sharing effect**). Αυτό που παρατηρείται είναι η μείωση της τιμής της παραμέτρου GAMMA για μικρό L και η αύξηση της για στενό W.

Για να αντιμετωπιστεί το charge sharing effect, έχουν εισαχθεί οι παράμετροι $LETA$, $WETA$, NCS .

- c) **Drain Induced Barrier Lowering (DIBL)**. Αυτό που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι η μείωση της τάσης κατωφλίου όταν έχουμε αυξημένη τάση V_{DS} .

Το μοντέλο EKV3, προσπαθώντας τα φαινόμενα αυτά να τα περιορίσει και να τα αντιμετωπίσει, έχει εισάγει ένα πλήθος παραμέτρων, έτσι ώστε η μοντελοποίηση τους να γίνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και οι προσομοιώσεις των κυκλωμάτων με την χρήση των παραμέτρων αυτών να βρίσκονται όσο πιο κοντά γίνεται σε πραγματικές συνθήκες.

3.3 Συμπεράσματα-Πλεονεκτήματα του EKV3 μοντέλου

Αυτό που εύκολα συμπεραίνουμε από την παραπάνω ανάλυση είναι ότι το EKV3 αποτελεί ένα πολύ δυνατό εργαλείο στα χέρια του σχεδιαστή αναλογικών κυκλωμάτων για να προχωρήσει στην υλοποίηση και προσομοίωση κυκλωμάτων η οποία προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα . Πρόκειται για ένα απλό μοντέλο το οποίο όμως καταφέρνει και καλύπτει όλο το φάσμα των περιοχών λειτουργίας των τρανζίστορ πράγμα πολύ σημαντικό μιας και όσο εξελίσσεται η τεχνολογία τόσο η λειτουργία των MOSFET μεταφέρεται από την ισχυρή στη μέτρια και ασθενή αναστροφή.

Συνοπτικά αναφέρονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα του EKV3 μοντέλου:

1. Κύριο και πιο βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου EKV3, είναι ότι επιτρέπει τη συνεχή και γραμμική λειτουργία του τρανζίστορ σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του, δηλαδή από την ασθενή μέχρι την ισχυρή αναστροφή. Το γεγονός αυτό καθίσταται ιδιαίτερος σημαντικό καθότι επιτρέπει στους σχεδιαστές αναλογικών κυκλωμάτων μεγάλη ευελιξία όσον αφορά φαινόμενα όπως ο θόρυβος πέρα από την ισχυρή αναστροφή, αλλά και μεγέθη που βελτιστοποιούνται με τη δυνατότητα να δουλεύουν σε ισχυρή αλλά και μέτρια αναστροφή. Είναι πράγματα σημαντικά στα οποία υστερεί το EKV3 έναντι των προηγούμενων μοντέλων.
2. Ένα δεύτερο βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι ότι βασίζεται στη φυσική, έχει λιγότερες παραμέτρους σε σχέση με άλλα μοντέλα και διέπεται από απλές και αναλυτικές εξισώσεις. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι καθίσταται πιο εύχρηστο και πιο προσιτό στο σχεδιαστή και έτσι μπορεί να το κατανοήσει και να το χειριστεί με μεγαλύτερη ευκολία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πλεονεκτήματος έναντι των άλλων μοντέλων αποτελεί το γεγονός το μοντέλο BSIM3 το οποίο και κυριαρχούσε στην αγορά απαιτούσε την ύπαρξη 100 περίπου παραμέτρων μόνο για το intrinsic DC μοντέλο, ενώ για το ίδιο μοντέλο, το EKV3, απαιτεί την ύπαρξη μόνο 18 παραμέτρων[5].

3. Γίνεται πολύ καλή μοντελοποίηση των μη γραμμικών φαινομένων που επηρεάζουν την απόδοση του τρανζίστορ.
4. Η κλίση n πλέον δεν θεωρείται ίση με τη μονάδα όπως σε προηγούμενα μοντέλα με αποτέλεσμα να λαμβάνονται υπόψη και οι χωρητικότητες του υποστρώματος και κατά συνέπεια να έχουμε μια πιο ακριβής προσομοίωση.
5. Καλύπτει όλες τις γενιές τρανζίστορ CMOS τεχνολογιών. Έχει δοκιμαστεί ως τώρα σε διαφορετικές γενιές τρανζίστορ (1 μ m, 0.5 μ m, 0.35 μ m, 0.25 μ m, 0.15 μ m, 0.11 μ m, 90nm) με ιδιαίτερος καλά αποτελέσματα σε όλες από αυτές, καθιστώντας το μοντέλο έγκυρο και αξιόπιστο. Στη διπλωματική εργασία αυτή χρησιμοποιείται η 0.5 μ m τεχνολογία.

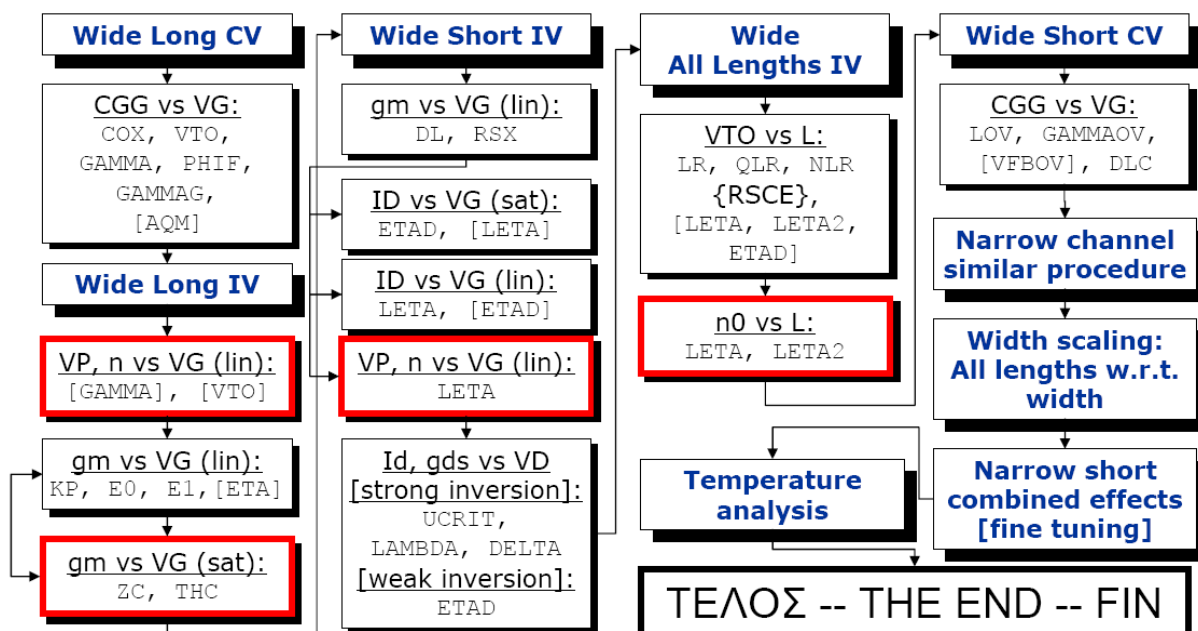
Συμπερασματικά λοιπόν και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καταλήγουμε στο ότι η προσομοίωση των κυκλωμάτων της 0.5 μ m τεχνολογίας που βασίζονται στο μοντέλο αυτό προσεγγίζουν κατά πολύ την πραγματικότητα και τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο των I-V όσο των C-V και της θερμοκρασίας στα επόμενα κεφάλαια.

4 Μετρήσεις και εξαγωγή παραμέτρων στην τεχνολογία 0.5um

Στόχος της εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί η εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου και να παρουσιαστεί πλήρες στην MOSFET τεχνολογία 0.5um. Για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία τόσο για τις μετρήσεις DC τάσης-ρεύματος των τρανζίστορ, όσο και για τις μετρήσεις χωρητικότητας C-V (capacitance-voltage) αλλά και ανάλυση των δεδομένων από τη σκοπιά της θερμοκρασίας.

4.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων

Τα βήματα που ακολουθήσαμε βασίζονται στην λεπτομερή μεθοδολογία εξαγωγής παραμέτρων που έχει αναπτυχθεί από τους A.Bazigos, M.Bucher [4]. Η εικόνα που ακολουθεί περιγράφει σε διάγραμμα ροής αναλυτικά τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να διεξαχθούν βήμα-βήμα οι σωστές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου EKV301.02.



Σχ. 4.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων EKV301.02

Η παραπάνω εικόνα δείχνει βήμα-βήμα τη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία γίνεται η εξαγωγή παραμέτρων υπό την προϋπόθεση ότι διαθέτουμε ήδη τις μετρήσεις των τρανζίστορ.

Ο στόχος κάθε φορά είναι να αλλάζουμε τις τιμές της κάθε παραμέτρου, ούτως ώστε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τις γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων που έχουμε πραγματοποιήσει στο εργαστήριο.

➤ Ανάλυση του διαγράμματος ροής εξαγωγής παραμέτρων

Τα βήματα που ακολουθούνται στο διάγραμμα ροής έχουν διαδοχικά ως εξής:

Βήμα 1: χρησιμοποιούμε τις Wide-Long CV μετρήσεις, ώστε να εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων *COX*, *VTO*, *GAMMA*, *PHI*, *GAMMA*, *GAMMAG*.

Βήμα 2: από τις μετρήσεις σε Wide – Long γεωμετρία:

- a) γραφική παράσταση $V_p - V_g$: βελτιώνουμε τις τιμές των *GAMMA*, *VTO*.
- b) γραφική παράσταση της διαγωγιμότητας g_m vs. V_g σε **linear mode**: εξάγουμε τις παραμέτρους *KP*, *E0*, *E1*, *ETA*,
- c) γραφική παράσταση $g_m - V_g$ σε **saturation mode**: εξάγουμε τις *ZC*, *THC*.

Βήμα 3: από τις μετρήσεις σε Wide - Short γεωμετρία:

- a) γραφική παράσταση $g_m - V_g(\text{lin})$, εξάγουμε τις τιμές των *DL*, *RLX*
- b) γραφική παράσταση $I_d - V_g(\text{sat})$, εξάγουμε τις τιμές *ETAD*, *[LETA]*
- c) γραφική παράσταση $I_d - V_g(\text{lin})$, εξάγουμε τις τιμές *LETA*, *[ETAD]*
- d) γραφική παράσταση $V_p - V_g$, εξάγουμε τις τιμές *LETA*
- e) γραφική παράσταση $I_d, g_{ds} - V_d$ (strong και weak inversion), εξάγουμε τις τιμές *UCRIT*, *LAMBDA*, *DELTA*.

Βήμα 4: για τις υπόλοιπες γεωμετρίες με διάφορες τιμές L και μεγάλου W (wide/long, wide/short):

- a) εξάγονται οι τιμές των παραμέτρων *LR*, *QLR*, *NLR*
- b) ενώ παράλληλα βελτιώνονται και οι τιμές των *LETA*, *ETAD*.

Βήμα 5: Χρησιμοποιούμε τις Wide - Short CV μετρήσεις, ώστε να εξάγουμε τις παραμέτρους *LOV*, *GAMMAOV*, *DLC*.

Βήμα 6: Στη συνέχεια, ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το **narrow** μοντέλο, έτσι ώστε να εξαχθούν σωστά και οι τιμές που εξαρτώνται από το πλάτος καναλιού *W*.

- a) Εν συντομία, από τις μετρήσεις σε narrow/long εξάγονται οι παράμετροι *DW*, *WETA*, *WE0*, *WE1*
- b) από all widths/long οι παράμετροι *WR*, *QWR*, *NWR*
- c) από την narrow/short οι *WDL*, *WUCRIT*, *WRLX*, *WLAMBDA*
- d) από την all widths/short οι *WLR*, *WQLR*, *WNLR*
- e) από την narrow/all lengths οι παράμετροι *LWR*, *LQWR*, *LNWR*.

Βήμα 7: Τέλος, η διαδικασία εξαγωγής παραμέτρων ολοκληρώνεται με την **ανάλυση της θερμοκρασίας** και την επίδρασή της στα δεδομένα που διαθέτουμε.

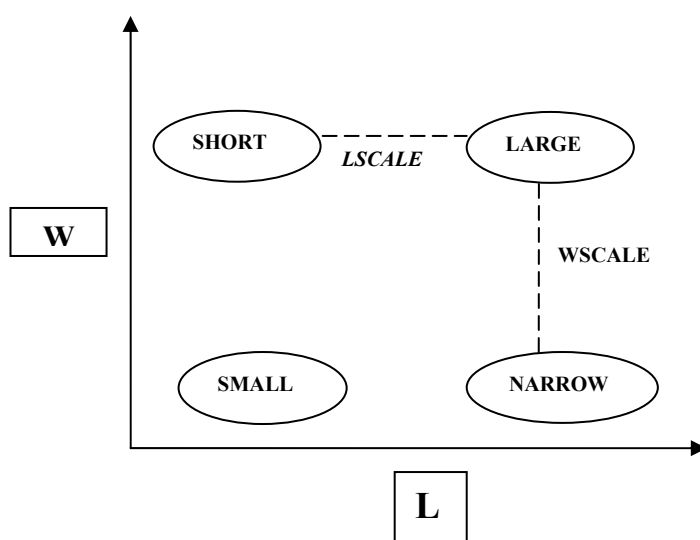
- a) Εν συντομία, από τις μετρήσεις θερμοκρασίας σε wide/long εξάγονται οι παράμετροι *TCV*, *BEX*, *TETA*, *TE0EX*, *TE1EX*
- b) Για τις μετρήσεις θερμοκρασίας σε wide/short οι *UCEX*, *TLAMBDA*
- c) Και τέλος για το narrow μοντέλο αναπροσαρμόζουμε τα *UCEX* και *LAMBDA* μέσω των *WUCEX*, *WLAMBDA*.

Ακολουθώντας τα βήματα που αναπτύχθηκαν παραπάνω, θα έχουμε επιτύχει να εξάγουμε ένα πλήρες σετ τιμών των παραμέτρων που περιγράφουν πλήρως το EKV3 μοντέλο.

4.2 Η λειτουργία του EKV3 μοντέλου

Για να μπορεί να γίνει η κατανοητό το EKV301.02 μοντέλο, θα πρέπει καταρχάς να γίνει αντιληπτό το πώς συμπεριφέρεται αλλά και την επιρροή που έχουν στην προσομοίωση του οι αλλαγές στις τιμές των βασικών παραμέτρων του.

Η προσομοίωση του EKV3 μοντέλου, έγινε σε όλες τις γεωμετρίες τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS τρανζίστορ. Οι γεωμετρίες που μας ενδιαφέρουν περισσότερο να εξετάσουμε φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και εκεί ρίχνουμε το βάρος μας για να υπάρχουν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχ.4.2.1 Γεωμετρίες για λεπτομερή εξέταση

Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε με προσωμοιωτή τύπου Spice από το πρόγραμμα ADS στην τεχνολογία 0.5u, η οποία και μετρήθηκε εντός του εργαστηριακού χώρου.

Στις παραγράφους 4.3, 4.4 και 4.5, προσπαθήσαμε μέσω ενδεικτικών αλλαγών να φανεί το πώς επηρεάζεται το μοντέλο EKV3 από την αύξηση ή την μείωση των βασικών του παραμέτρων καθώς επίσης και παραμέτρων χωρητικότητας και θερμοκρασίας.

Τέλος, στα παραρτήματα II, III και IV εμφανίζονται όλες οι γραφικές παραστάσεις, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στο λογισμικό ICCAP.

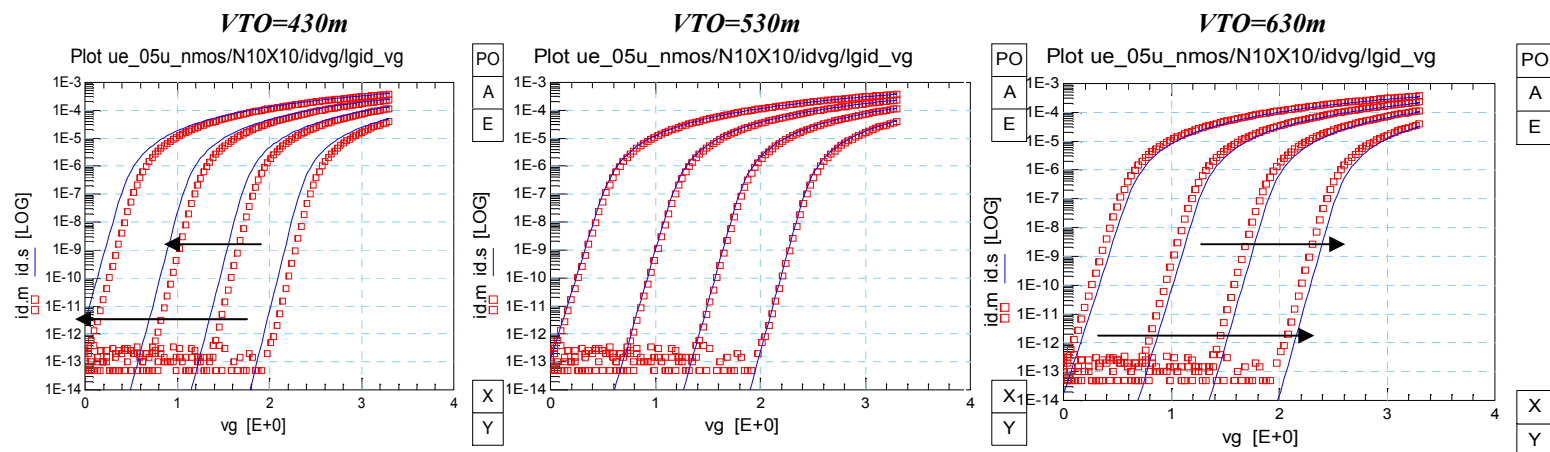
4.3 Μετρήσεις και εξαγωγή I-V παραμέτρων του EKV301.02 μοντέλου

Οι μετρήσεις των τρανζίστορ NMOS και PMOS στην τεχνολογία 0.5μm πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο on wafer και οι μετρήσεις έγιναν με τον Prober Cascade Microtech Summit 10600 όπως έχει προαναφερθεί.

4.3.1 Παράμετροι I-V για wide-long τρανζίστορ (10x10μm)

Στις γραφικές παραστάσεις που θα ακολουθήσουν, φαίνονται οι επιπτώσεις που έχουν οι αλλαγές των τιμών των παραμέτρων του EKV3 μοντέλου στην λειτουργία του τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS. Οι γραφικές παραστάσεις που δείχνουμε είναι των γεωμετριών, οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από την αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.

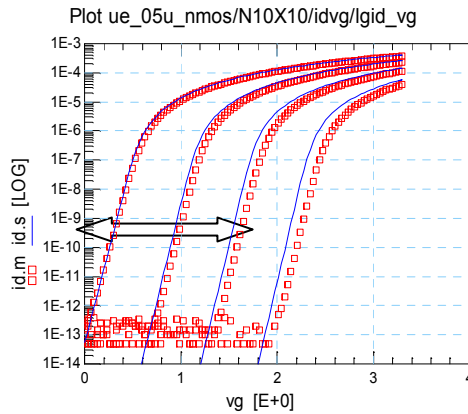
➤ Για την παράμετρο V_{TO} (threshold voltage) :



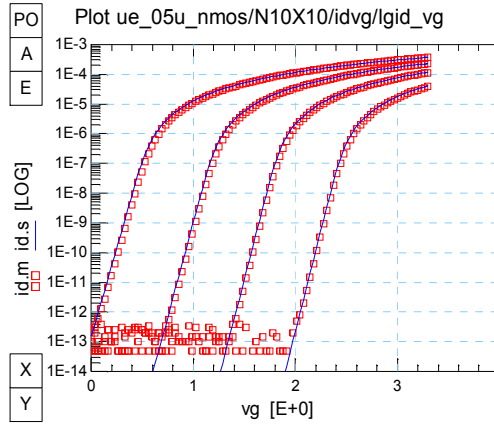
Παρατηρούμε πως όσο αυξάνει η τιμή της τάσης κατωφλίου (V_{TO}), τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, η προσομοίωση μεταφέρεται προς τα δεξιά στις γραφικές i_d - v_g .

➤ Για την παράμετρο **GAMMA** (Body Effect Coefficient) :

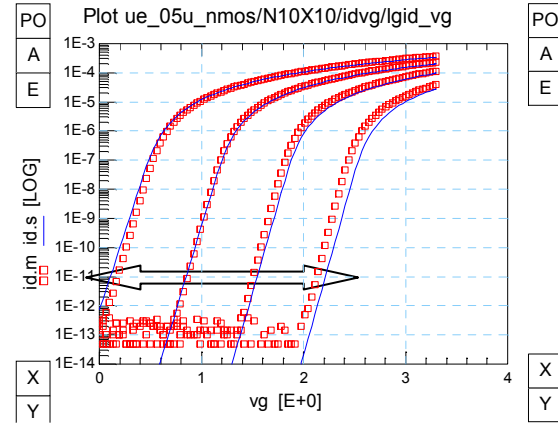
GAMMA = 510m



GAMMA = 710m



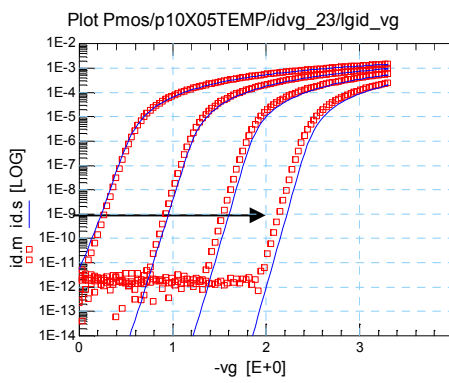
GAMMA = 910m



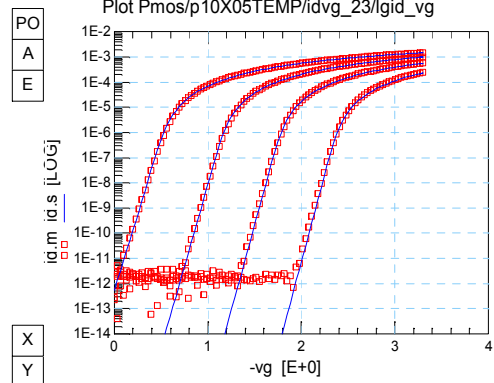
Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου GAMMA έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αραίωση των προσομοιώσεων.

➤ Για την παράμετρο **PHIF** (Bulk Fermi Potential) :

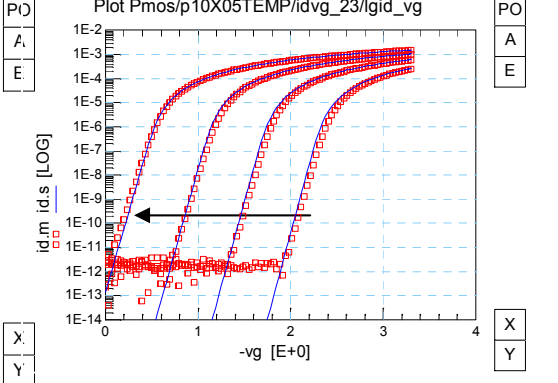
PHIF = 210m



PHIF = 410m



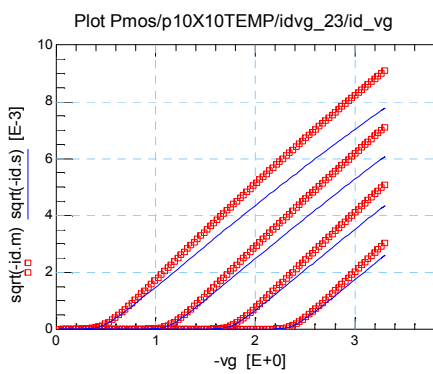
PHIF = 710m



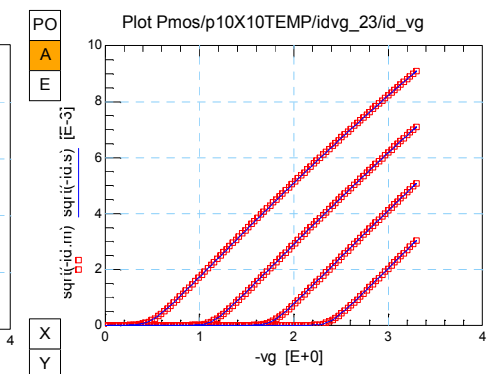
Παρατηρούμε πως όσο αυξάνει η τιμή της παραμέτρου PHIF, τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, η προσομοίωση μεταφέρεται προς τα αριστερά στις γραφικές.

➤ Για την παράμετρο **KP** (Mobility multiplied by COX):

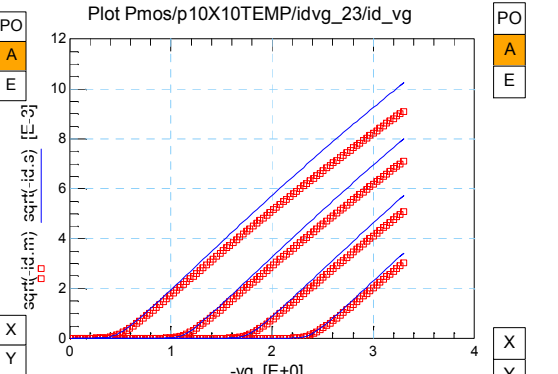
KP = 27.00um



KP = 37.00um

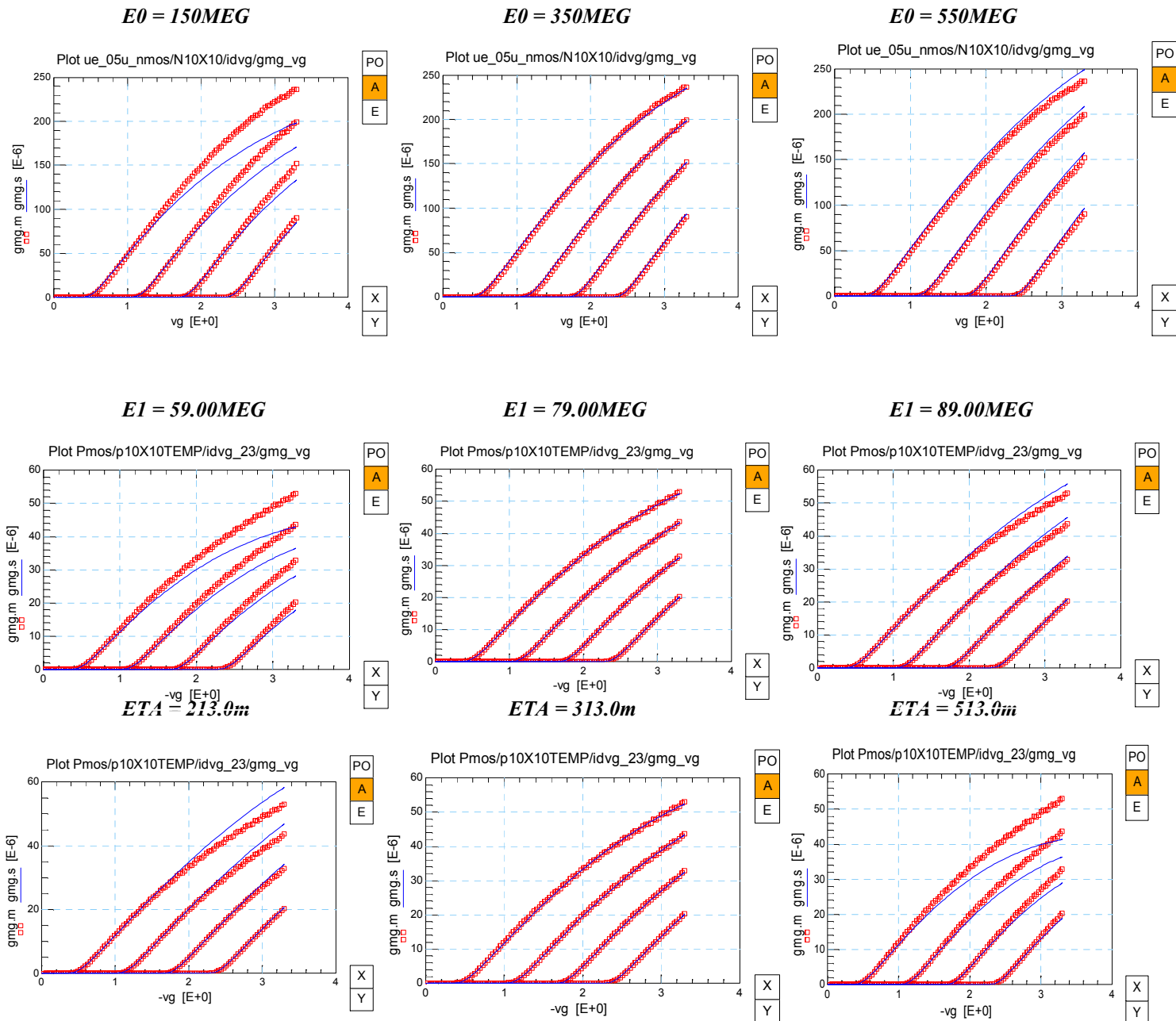


KP = 47.00um



Όσο πιο πολύ αυξάνει η τιμή του KP, τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, *αυξάνει η τιμή του ρεύματος κυρίως σε strong inversion*. Επίσης, αυξάνει και η τιμή της διαγωγιμότητας σε συγκεκριμένες τιμές τάσης v_g .

- Για τις παραμέτρους **E0, E1, ETA** (First and second Order Coefficient for Mobility Reduction due to Vertical Field, Mobility Reduction due to Vertical Field Factor):



Όσο πιο πολύ αυξάνουν οι τιμές των παραμέτρων $E0$, $E1$ τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, *αυξάνει η τιμή του ρεύματος κυρίως σε moderate και σε strong inversion*. Η παράμετρος $E0$ επηρεάζει κυρίως σε ισχυρή αναστροφή και παρατηρούμε ότι μικρές

διακυμάνσεις στις τιμές της επιφέρουν πολύ μικρές αυξήσεις στις τιμές του ρεύματος και της διαγωγιμότητας. Η παρμικρή αλλαγή της παραμέτρου E1 επιφέρει πιο μεγάλες αυξήσεις στις τιμές του ρεύματος και της διαγωγιμότητας απ'ότι η E0, ενώ επηρεάζει τις γραφικές τόσο σε μέτρια όσο και σε ισχυρή αναστροφή. Τέλος, η αύξηση της παραμέτρου ETA επιφέρει μείωση στο ρεύμα και στην διαγωγιμότητα, τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, σε όλες τις γεωμετρίες.

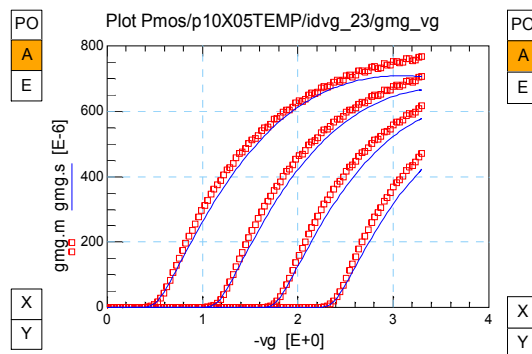
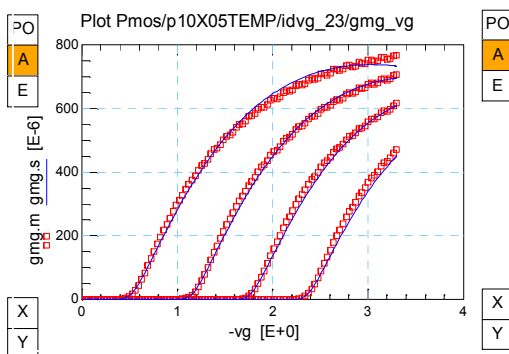
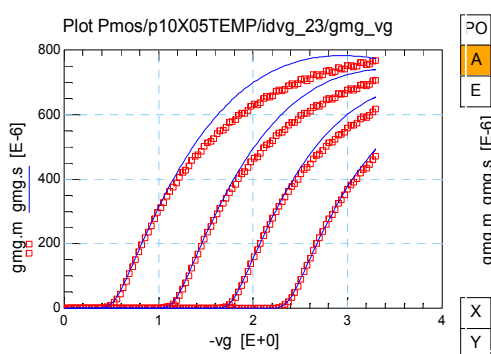
4.3.2 Παράμετροι I-V για wide-short τρανζίστορ (10x 0.5um)

- Για τις παραμέτρους **DL**, **RLX** (Effective Length Parameter, Series resistance(symmetric model)):

DL = -160.0n

DL = -88.0n

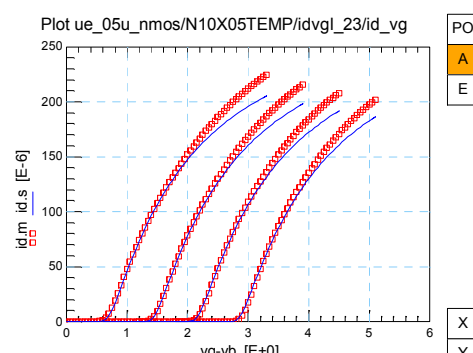
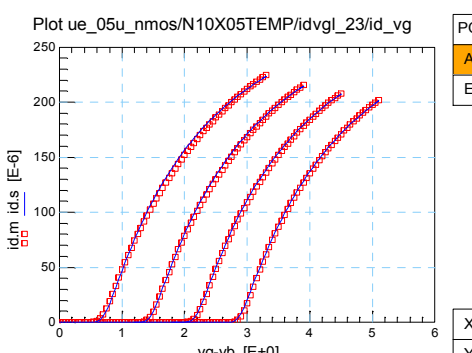
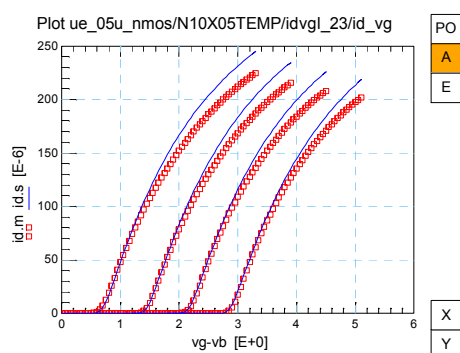
DL = -58.0n



RLX = 400.0u

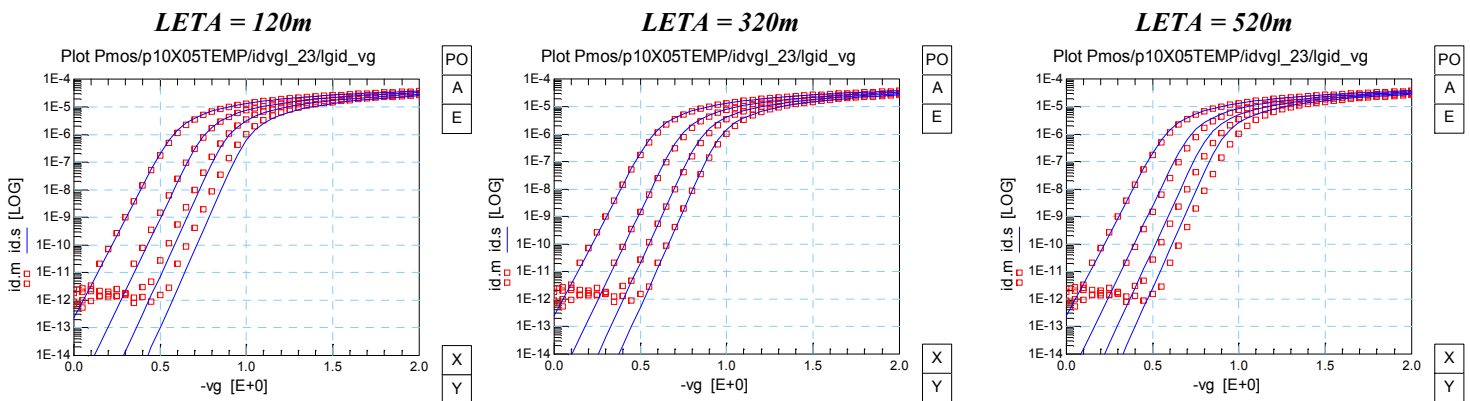
RLX = 500.0u

RLX = 600.0u



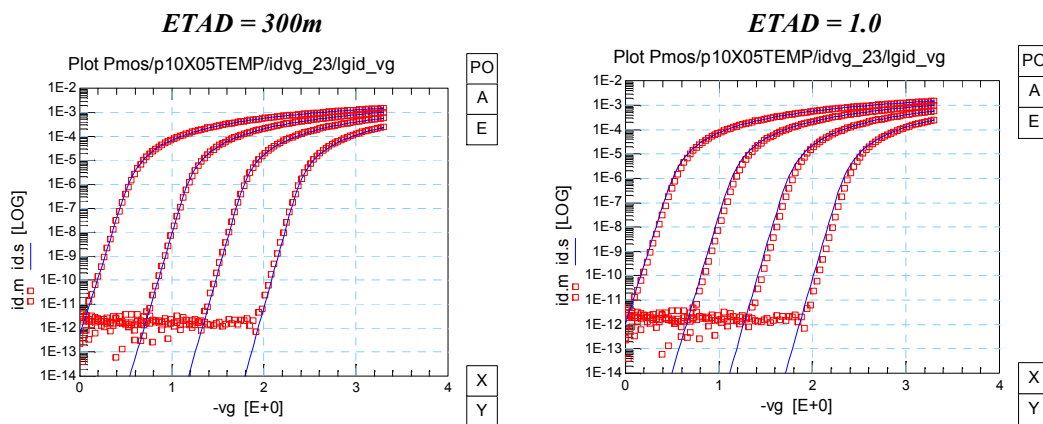
Οι παράμετροι **DL**, **RLX** δεν επηρεάζουν καθόλου την wide/long γεωμετρία αλλά μόνο την wide/short. Παρατηρούμε ότι όταν οι τιμές των παραμέτρων αυτών αυξάνονται, μειώνονται οι τιμές των διαγωγιμοτήτων.

➤ Για την παράμετρο **LETA** (Short Channel Charge Sharing Coefficient):



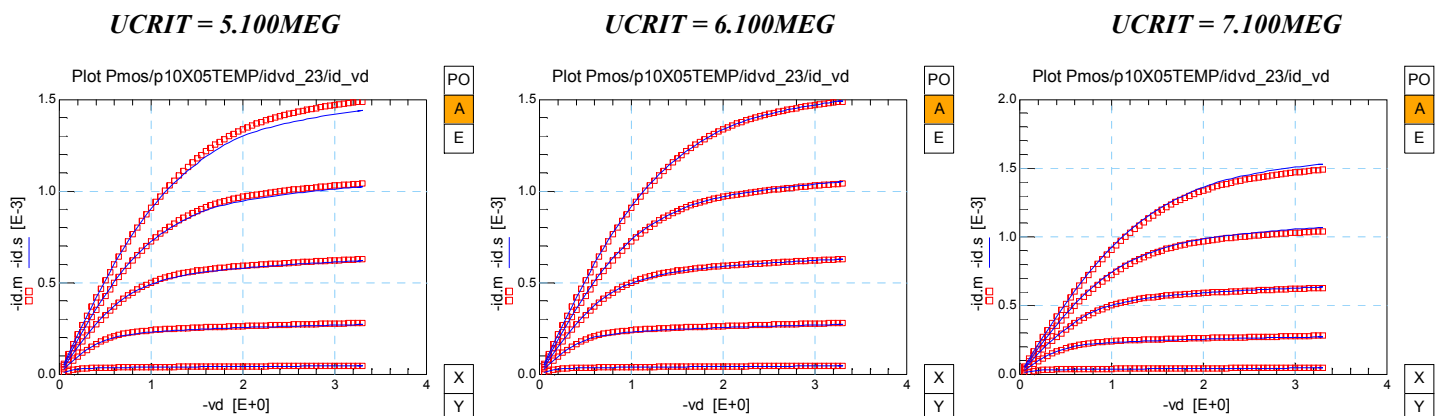
Η παράμετρος **LETA**, αντιμετωπίζει την αλλαγή του φαινομένου σώματος και επηρεάζει μόνο τα short τρανζίστορ. Η αύξηση του **LETA** πυκνώνει προς τα αριστερά τη γραφική i_d - v_g στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ, ενώ η μείωση της αραιώνει προς τα δεξιά την γραφική i_d - v_g .

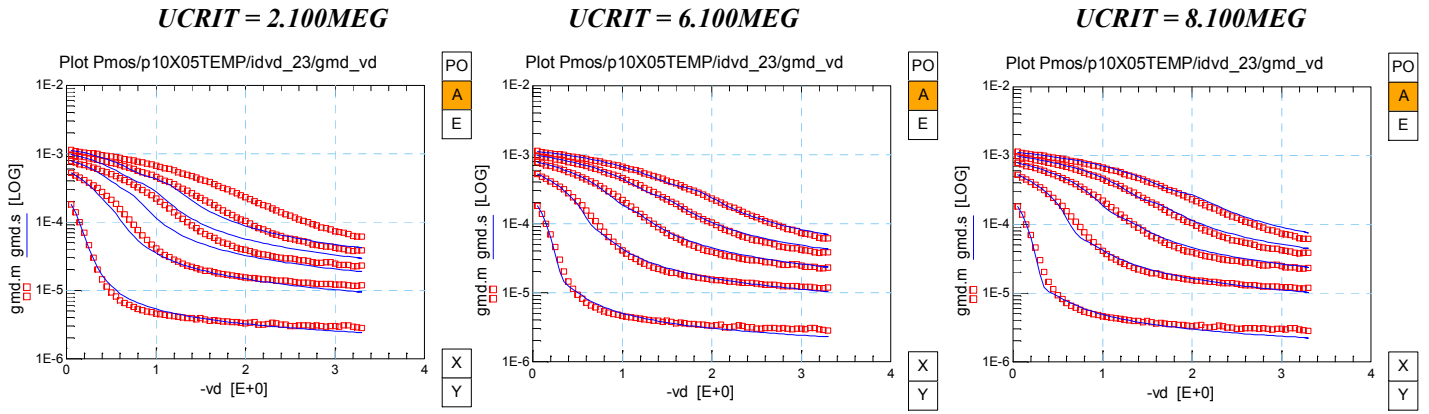
➤ Για την παράμετρο **ETAD** (Primary DIBL Coefficient):



Η παράμετρος **ETAD**, αντιμετωπίζει το φαινόμενο Drain Induced Barrier Lowering, δηλαδή τη μετατόπιση της τιμής τάσης κατωφλίου σε αυξημένο V_{ds} . Η αύξηση του **ETAD** μετατοπίζει προς τα αριστερά τη γραφική i_d - v_g στην περιοχή κορεσμού του τρανζίστορ.

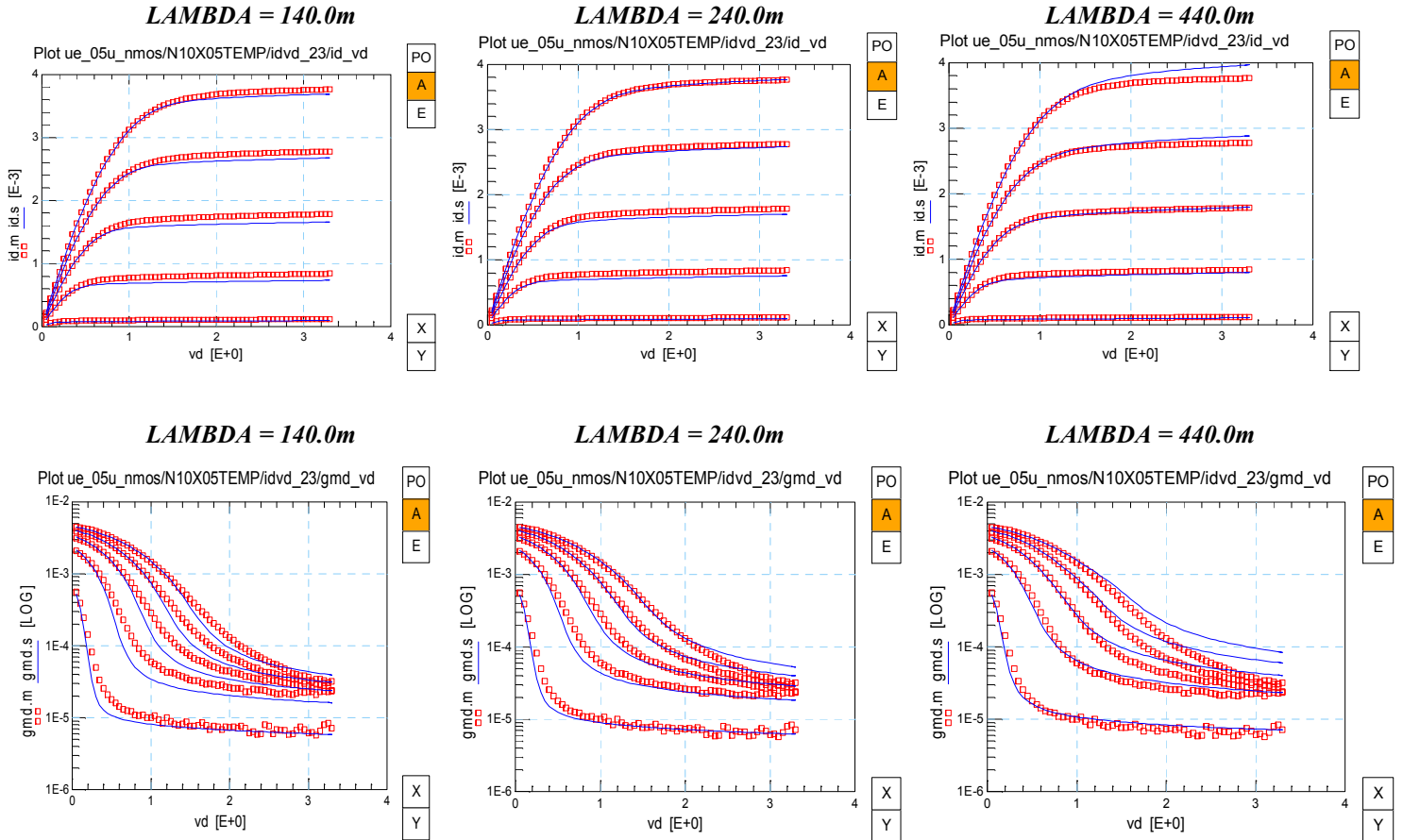
➤ Για την παράμετρο **UCRIT** (Critical Velocity of Electrons):





Για την παράμετρο $UCRIT$ αντιλαμβανόμαστε κυρίως αλλαγές στο id - vd (τόσο στην γραφική του ρεύματος όσο και της διαγωγιμότητας). Η αύξηση της τιμής αυξάνει και τις κλίσεις των γραφικών.

➤ Για την παράμετρο $LAMBDA$ (Early effect factor):



Για την παράμετρο $LAMBDA$, όπως και στη περίπτωση του $UCRIT$ αντιλαμβανόμαστε κυρίως αλλαγές στο id - vd (τόσο στην γραφική του ρεύματος όσο και της διαγωγιμότητας). Οι παράμετροι αυτές αναφέρονται στο Φαινόμενο διαμόρφωσης του μήκους καναλιού L . Η αύξηση της τιμής $LAMBDA$ αυξάνει και τις κλίσεις των γραφικών.

4.4 Μετρήσεις και εξαγωγή C-V παραμέτρων του EKV301.02 μοντέλου

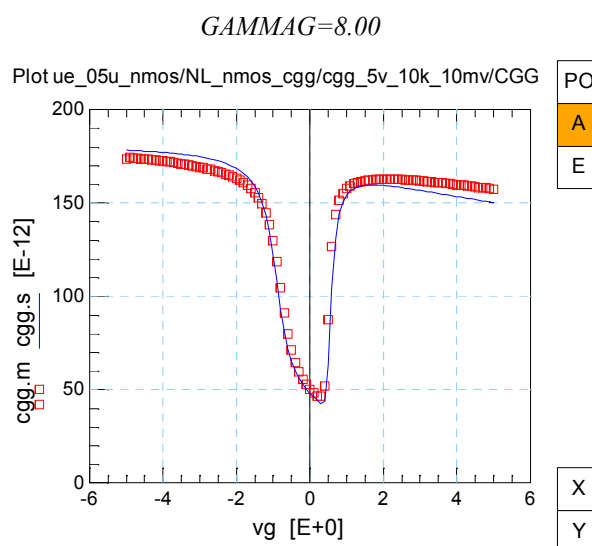
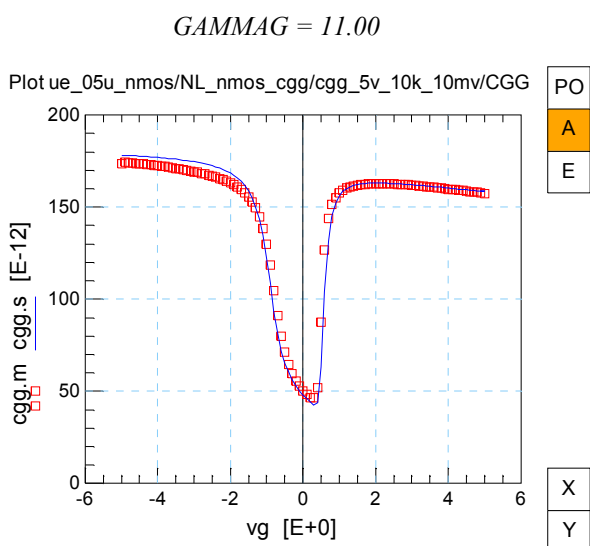
Οι μετρήσεις των χωρητικότητων των τρανζίστορ NMOS και PMOS στην τεχνολογία 0.5um προϋπαρχαν και είχαν πραγματοποιηθεί από τον καθηγητή Matthias Bucher. Πάνω στις μετρήσεις αυτές στηριχτήκαμε και πραγματοποιήσαμε τη εξαγωγή των παραμέτρων χωρητικότητας του EKV301.02 μοντέλου. Στο τέλος, εξαιτίας της επίδρασης των C-V παραμέτρων στα I-V δεδομένα, πραγματοποιήσαμε επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων για τα I-V δεδομένα, βελτιωμένες περαιτέρω και να υποστηρίζουν την εξαγωγή των C-V παραμέτρων του μοντέλου όπως αναλύθηκε και στη διαδικασία του διαγράμματος ροής (βλ. ενότητα 4.1).

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιάσουμε την επιρροή των παραμέτρων χωρητικότητας του μοντέλου, ούτως ώστε να γίνουν σαφώς αντιληπτές οι μεταβολές που αυτές προκαλούν και τα φαινόμενα που αυτές αντιμετωπίζουν.

Σημειώνουμε, ότι οι γραφικές που παρουσιάζονται, επιλέχθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία των παραμέτρων χωρητικότητας. Δεν παρουσιάζονται όλες μαζί καθώς κάτι τέτοιο παρατίθεται στο Παράρτημα III.

4.4.1 Παράμετροι C-V για wide-long τρανζίστορ (660um/76um)

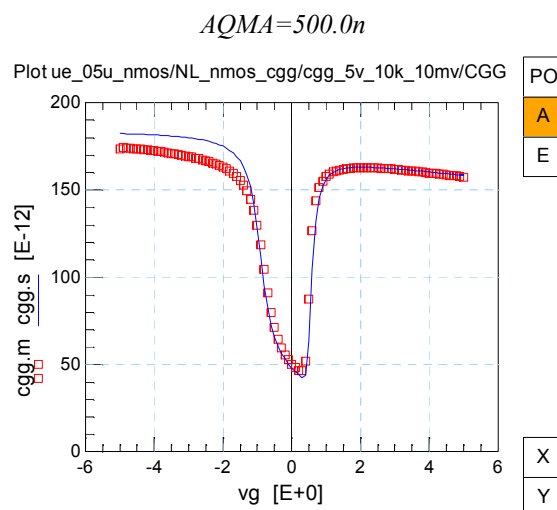
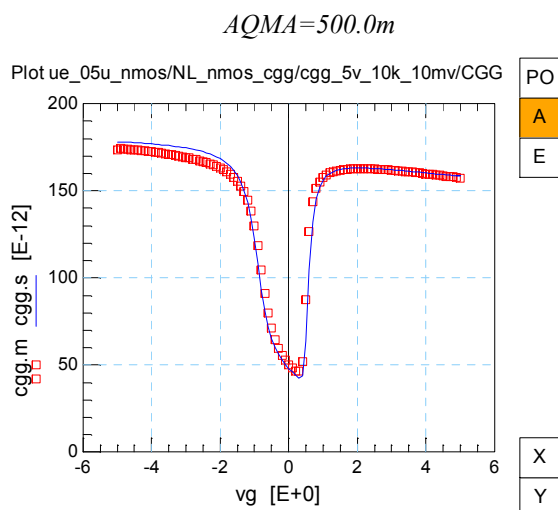
- ο Παράμετρος **GAMMAG** (Polysilicon depletion effect)



Η παράμετρος *GAMMAG*, αναφέρεται στο φαινόμενο μείωσης λόγω του πολυπυριτίου. Επηρεάζει την περιοχή του Depletion στις καμπύλες C-V.

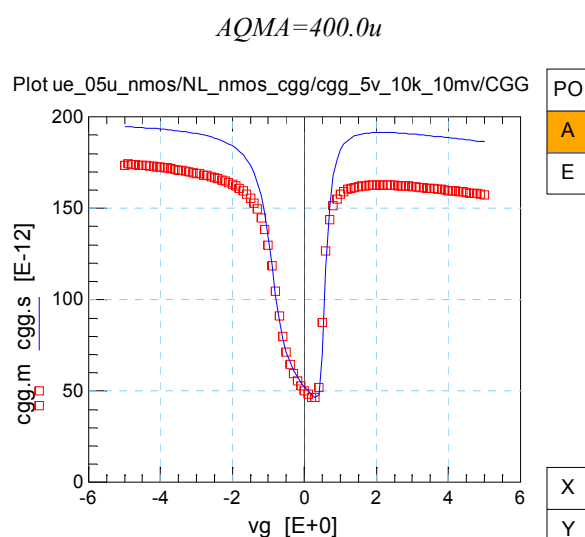
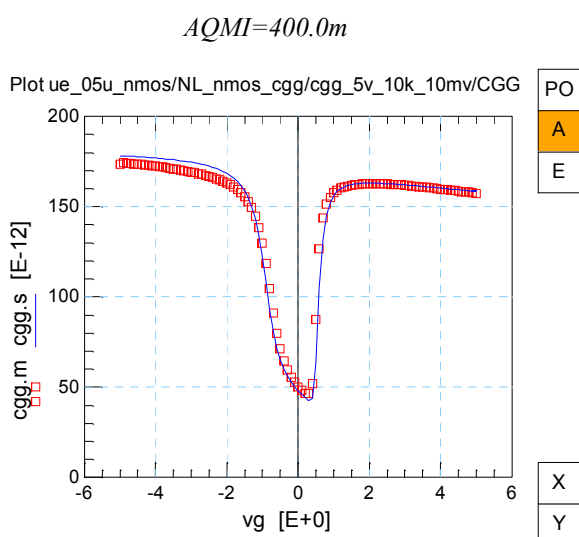
a) Quantum effects

- ο Παράμετρος **AQMA** (Quantum effect coefficient for Accumulation Region)



Η παράμετρος AQMA αναφέρεται στο συντελεστή για τα quantum effects στην περιοχή του accumulation. Η μείωση της τιμής της παραμέτρου αυξάνει την τιμή της χωρητικότητας στο Accumulation region.

- ο Παράμετρος **AQMI** (Quantum effect coefficient for Inversion Region)



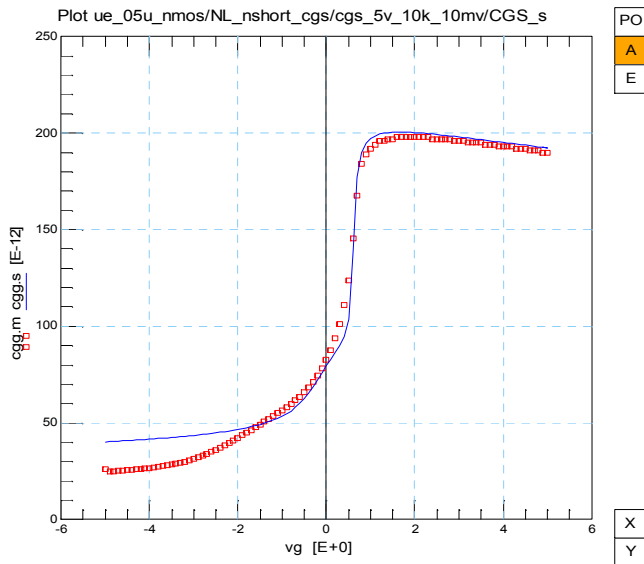
Η παράμετρος AQMI αναφέρεται στο συντελεστή για τα quantum effects στην περιοχή της αναστροφής (Inversion). Η μείωση της τιμής της παραμέτρου αυξάνει την τιμή της χωρητικότητας της πύλης στην περιοχή της αναστροφής.

4.4.2 Παράμετροι C-V για wide-short τρανζίστορ(96.10nm/500nm)

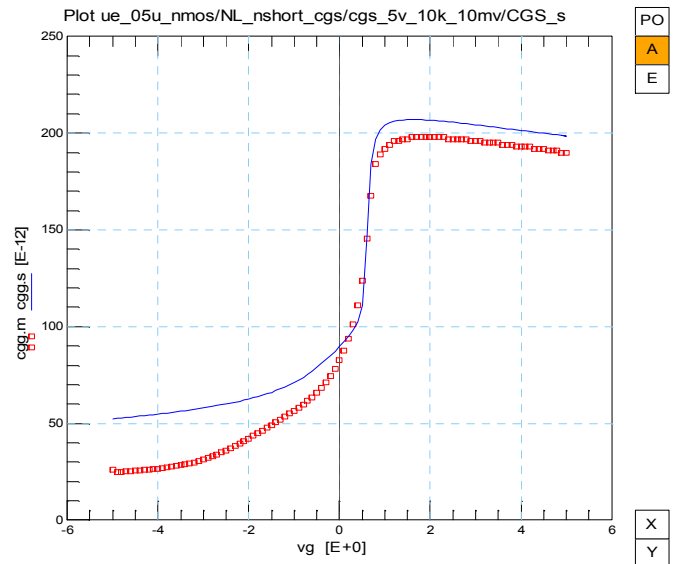
b) Overlap Capacitances

ο Παράμετρος **GAMMAOV**(Overlap Capacitance)

$$GAMMAOV = 1.00$$



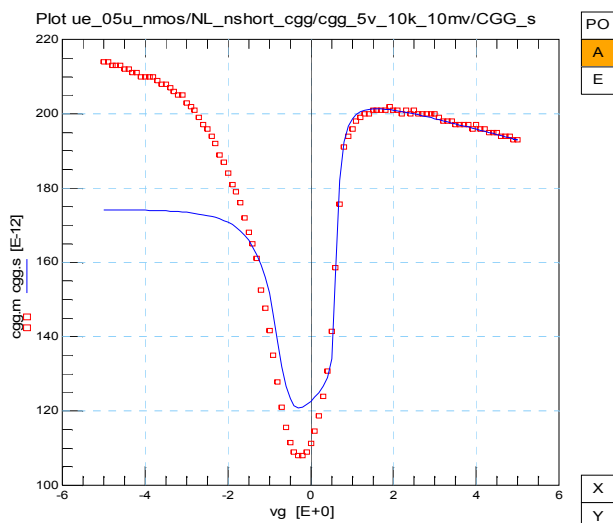
$$GAMMAOV = 2.00$$



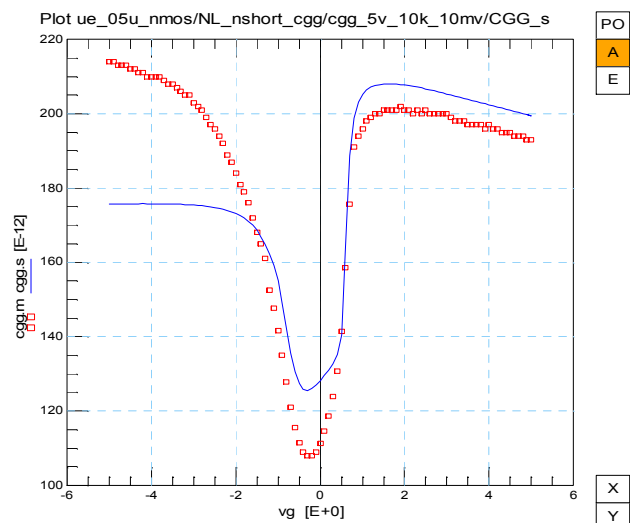
Η παράμετρος $GAMMAOV$ αναφέρεται στη χωρητικότητα overlap (C_{gbo}, C_{gdo}). Συγκεκριμένα και στη γραφική που μελετάμε, παρατηρούμε πως με το διπλασιασμό της τιμής της $GAMMAOV$ αυξάνεται η τιμή της overlap χωρητικότητας μεταξύ Gate και Source.

ο Παράμετρος **LOV**(Length of the overlap area)

$$LOV = 70.0n$$



$$LOV = 80.00n$$



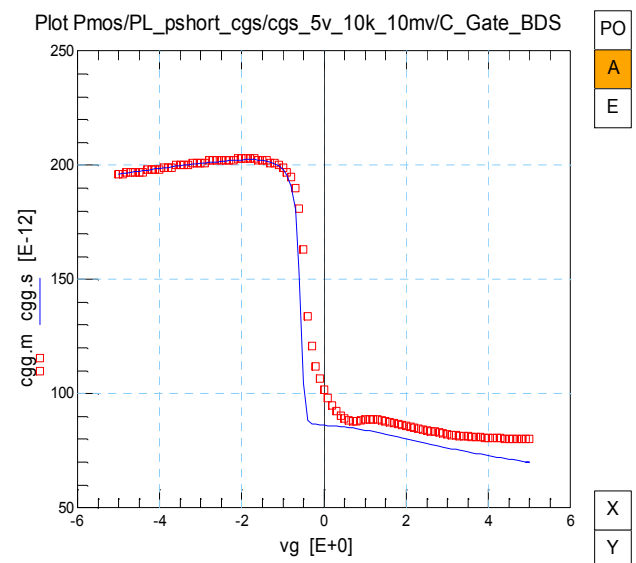
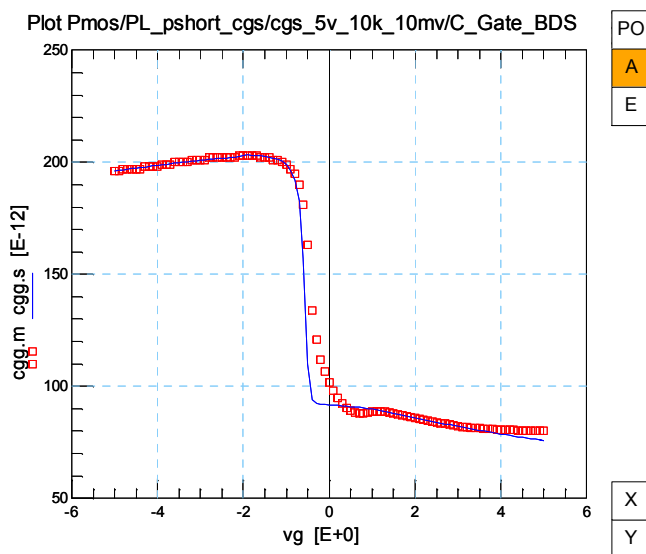
Η παράμετρος LOV αναφέρεται στο μήκος της περιοχής overlap(l_{ov}). Συγκεκριμένα και στη γραφική που μελετάμε, παρατηρούμε πως με το διπλασιασμό της τιμής της LOV αυξάνεται η τιμή της overlap χωρητικότητας στο Gate στην περιοχή της αναστροφής στις χαμηλές συχνότητες.

c) Fringing Capacitances

ο Παράμετρος KJF (Fringing Capacitance factor)

$$KJF = 30.00p$$

$$KJF = 10.00p$$

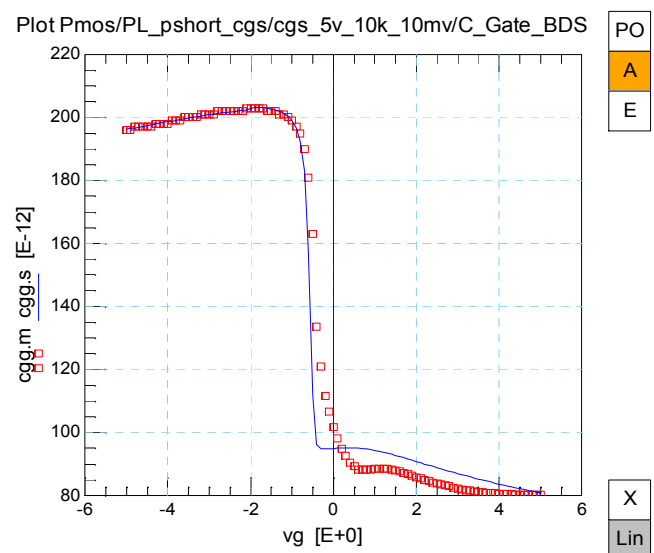
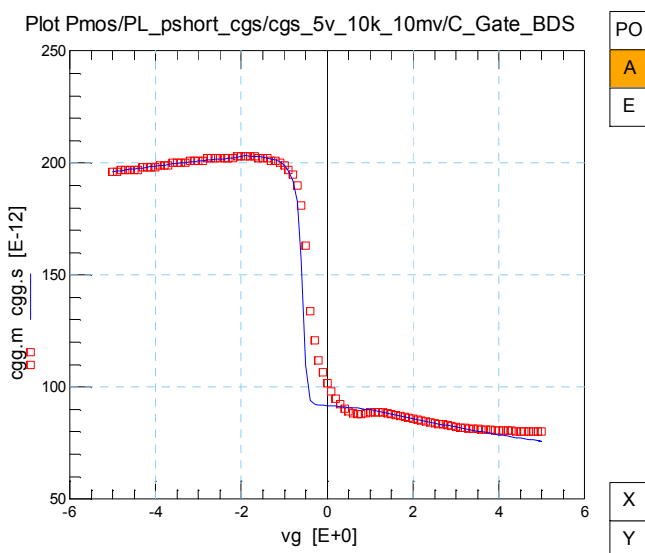


Η παράμετρος KJF αναφέρεται στον παράγοντα για τις fringing χωρητικότητες. Μειώνοντας την τιμή της παραμέτρου, παρατηρούμε μεγαλύτερη απόκλιση από την τιμή της μέτρησης στη περιοχή της αναστροφής και μάλιστα στις υψηλές συχνότητες.

ο Παράμετρος CJF (Fringing Capacitance bias factor)

$$CJF = 1.00$$

$$CJF = 1.80$$



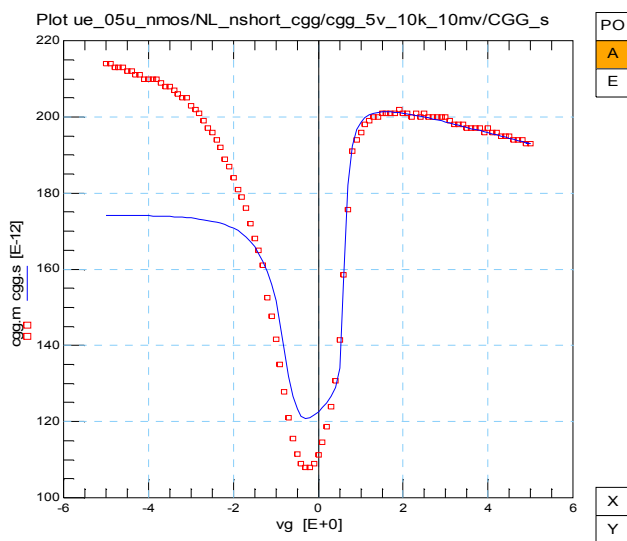
Η παράμετρος KJF αναφέρεται στον παράγοντα τάσης για τις fringing χωρητικότητες.

Αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου, παρατηρούμε απόκλιση από την τιμή της μέτρησης στη περιοχή της αναστροφής στις υψηλές συχνότητες.

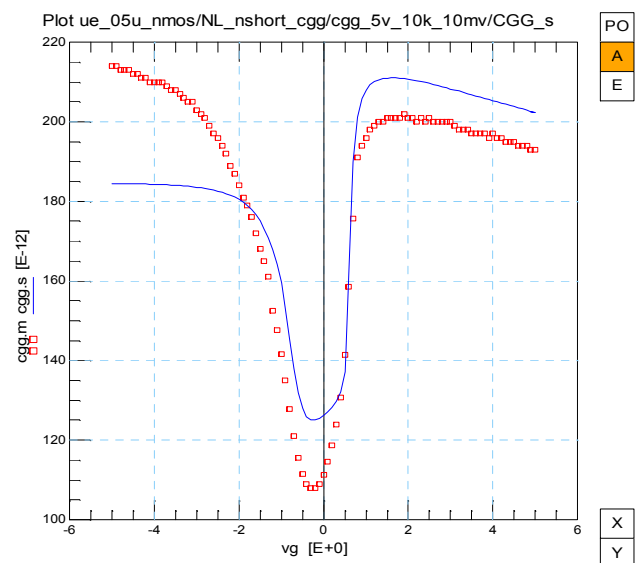
d) Geometrical Parameters

ο Παράμετρος **DLC**(Effective Length Parameter for Capacitance)

$DLC = 89.00n$



$DLC = 120.00n$



Η παράμετρος DLC , αναφέρεται στο ενεργό μήκος καναλιού για τη χωρητικότητα. Όπως θα φαίνεται καθαρά και από τις παραπάνω γραφικές, η αύξηση της τιμής της παραμέτρου DLC προκαλεί έντονη αύξηση στη χωρητικότητα της πύλης στην περιοχή της αναστροφής.

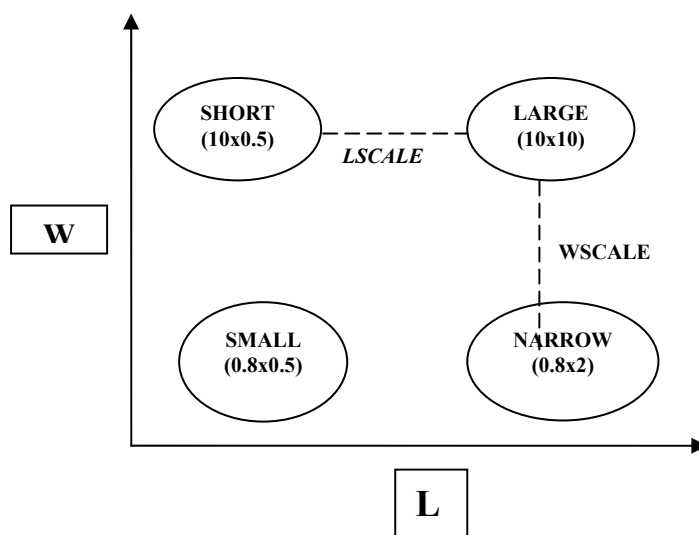
4.5 Θερμοκρασιακή ανάλυση στα I-V δεδομένα

Στη διαδικασία της θερμοκρασιακής ανάλυσης των I-V δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες μετρήσεις των τρανζίστορ επι του ιδίου wafer σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες: την φυσική θερμοκρασία (23°C), μια ενδιάμεση (85 °C) και μια υψηλή (115 °C).

Οι μετρήσεις αυτές είχαν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν από τον καθηγητή κ. *Matthias Bucher* και διατέθηκαν ούτως ώστε να γίνει η εξαγωγή των παραμέτρων της θερμοκρασίας στην τεχνολογία 0.5μm και να μπορέσουμε έτσι να παρουσιάσουμε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που θα καλύπτει όλα τα φαινόμενα στην τεχνολογία αυτή.

Τα δεδομένα των θερμοκρασιών διατίθενται σε 8 γεωμετρίες Nmos και Pmos. Αυτές είναι η γεωμετρία **wide-long** (10x10), η **wide-short** (10x0.5), η **narrow-long** (0.8x2) και η **narrow-short** (0.8x0.5) καθώς και **ενδιάμεσες γεωμετρίες** όπως η (10x2), η (10x1), η (10x0.7) και η (1x2).

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε, περιγράφηκε αναλυτικά στο διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων στην παράγραφο 4.1. Σκοπός μας ήταν να εξαγάγουμε τη θερμοκρασιακή ανάλυση σε όλες τις θερμοκρασίες (23, 85 και 115 °C) και σε όλες τις διαθέσιμες γεωμετρίες με ιδιαίτερο βάρος στις 4 ακριανές που φαίνονται παρακάτω:



Σχ.4.4.1 Διαθέσιμες γεωμετρίες για θερμοκρασιακή ανάλυση

Κατά την εξαγωγή των παραμέτρων θερμοκρασίας και μετά το τέλος της, έχουμε μια αναμενόμενη μεταβολή των τιμών των αντίστοιχων παραμέτρων σε default συνθήκες, συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η αναπροσαρμογή τους για να μην επηρεαστούν τα δεδομένα σε φυσιολογικές συνθήκες. Βασικές παράμετροι όπως η τάση κατωφλίου (V_{TO}), η παράμετρος ενέργεια Fermi του υποστρώματος PHIF, η θερμοδυναμική τάση U_T αλλά και άλλες, επηρεάζονται σημαντικά από την παράμετρο θερμοκρασία. Αυτό φαίνεται και αναλυτικά παρακάτω από τη σχέση που έχουν οι παράμετροι θερμοκρασίας και οι αρχικές παράμετροι που αντιμετωπίζουν τα φαινόμενα για τα οποία η καθεμία υπάρχει.

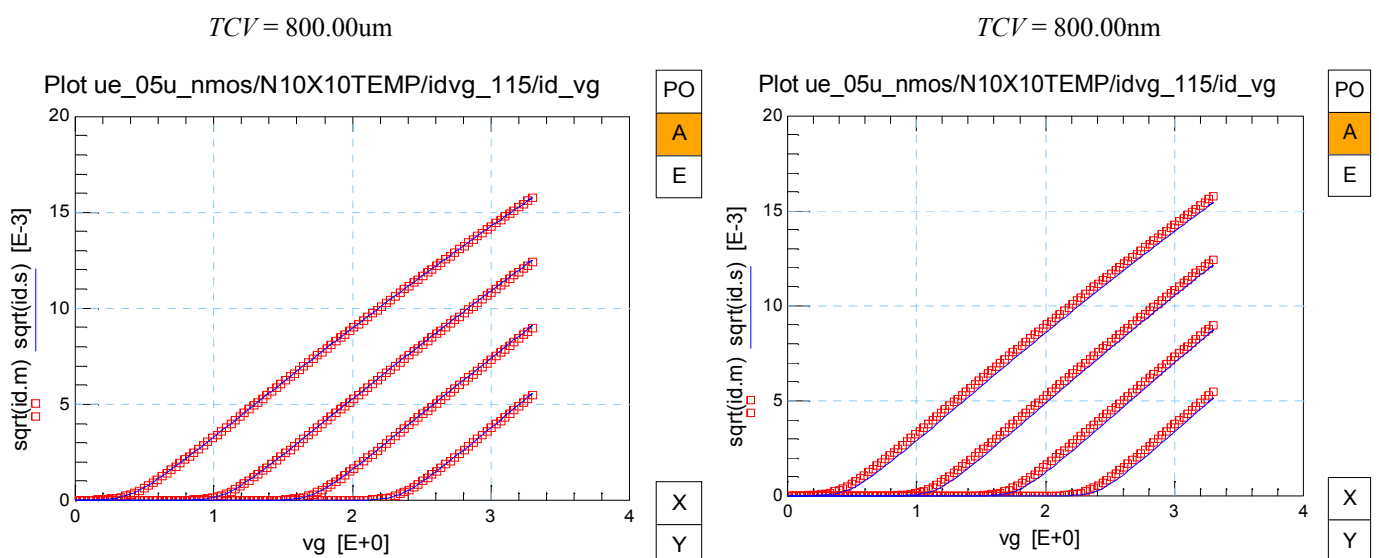
Τέλος, θα παρουσιάσουμε την επιρροή των παραμέτρων θερμοκρασίας του μοντέλου στην υψηλότερη θερμοκρασία των δεδομένων που διαθέτουμε (115°C), ούτως ώστε να γίνουν σαφώς αντιληπτές οι μεταβολές που αυτές προκαλούν και τα φαινόμενα που αυτές αντιμετωπίζουν.

Σημειώνουμε, ότι οι γραφικές που παρουσιάζονται, επιλέχθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία των παραμέτρων θερμοκρασίας. Δεν παρουσιάζονται όλες μαζί καθώς κάτι τέτοιο παρατίθεται στο Παράρτημα IV.

4.5.1 Παράμετροι Θερμοκρασίας για τρανζίστορ wide-long(10x10um)

e) Temperature Parameters

- ο Παράμετρος **TCV** (Temperature Dependence of V_{TO} - threshold voltage)

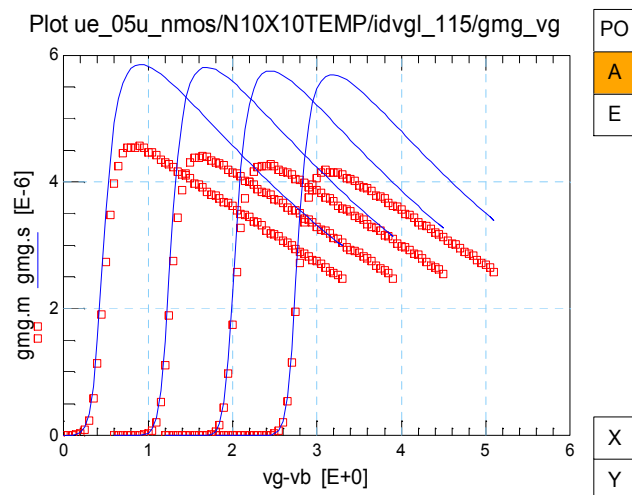
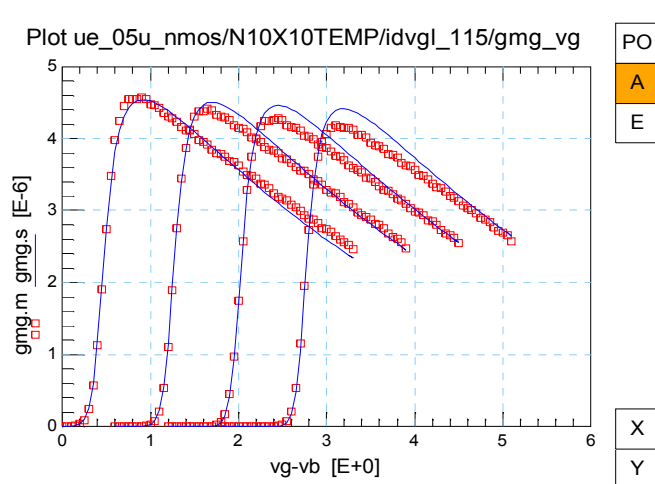


Είναι ενδεικτική η μεταβολή που προκαλεί στην τάση κατωφλίου η μείωση της παραμέτρου TCV απο τα 800um στα 800 nm.

ο Παράμετρος **BEX** (Temperature Dependence of KP -mobility)

$BEX = -1.57 \mu m$

$BEX = -570.0 m$

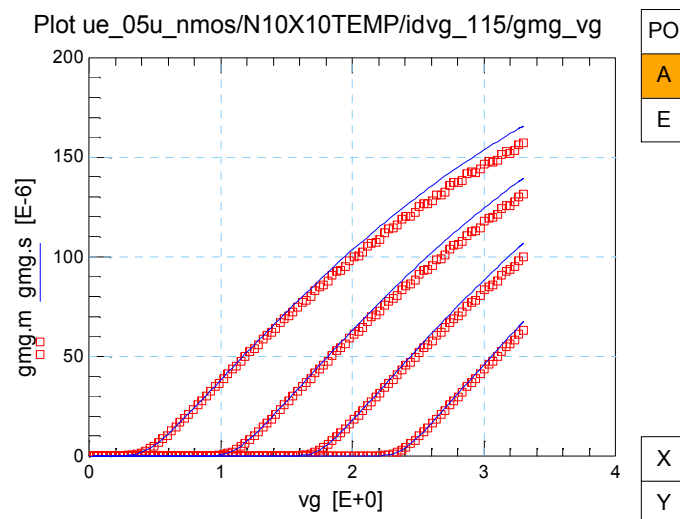
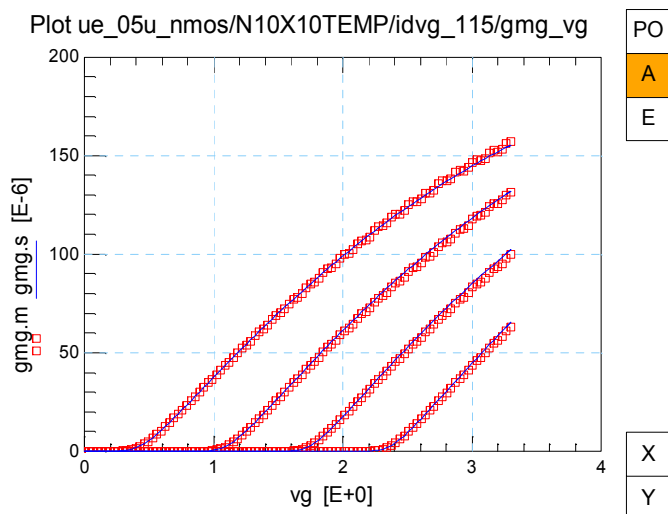


Είναι ενδεικτική η μεταβολή που προκαλεί στην κινητικότητα των ηλεκτρονίων η αύξηση της παραμέτρου BEX απο τα -1.57 στα -570m.

ο Παράμετρος **TE0EX** (Temperature Dependence of $E0$)

$TE0EX = 1.2$

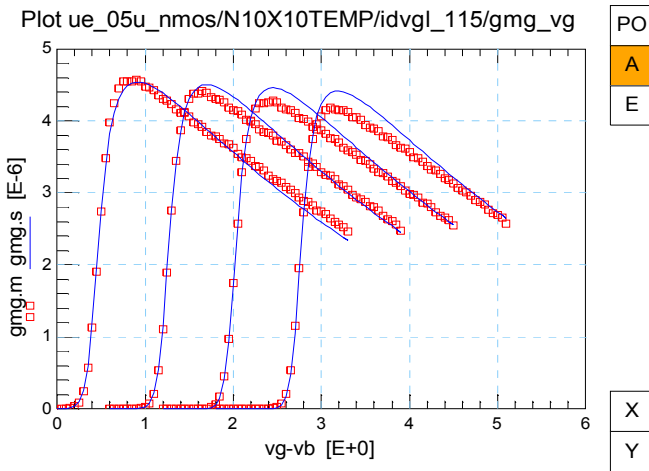
$TE0EX = 2.5$



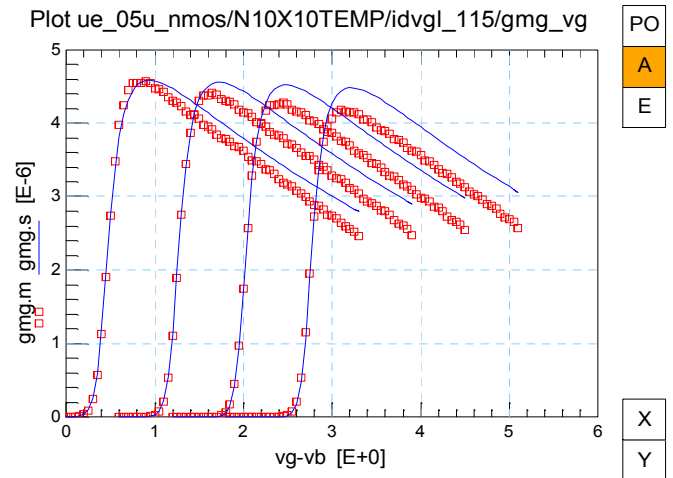
Φαίνεται καθαρά η μεταβολή που προκαλεί η τιμή του πρωτοτάξιου συντελεστή της μείωσης της κινητικότητα των ηλεκτρονίων λόγω του κάθετου πεδίου. Η αύξηση της παραμέτρου θερμοκρασίας TE0EX απο τα 1.2 στα 2.5 επηρεάζει σαφώς την παράμετρο E0 ως προς τη θερμοκρασία.

- Παράμετρος **TE1EX** (Temperature Dependence of $E1$)

$TE1EX = 2.5$



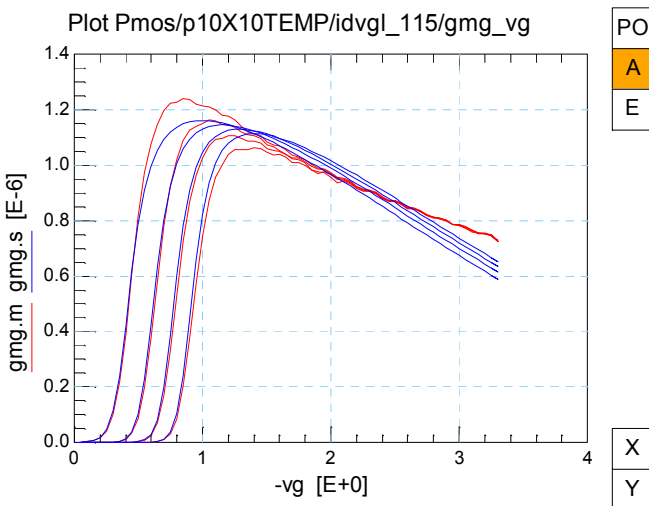
$TE1EX = 4.5$



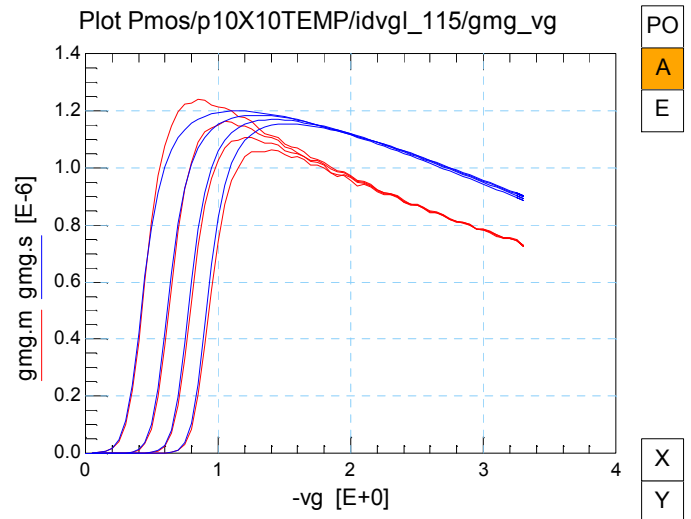
Ομοίως και για την μεταβολή που προκαλεί η τιμή του δευτεροτάξιου συντελεστή της μείωσης της κινητικότητας των ηλεκτρονίων λόγω του κάθετου πεδίου. Η αύξηση της παραμέτρου θερμοκρασίας $TE1EX$ από τα 2.5 στα 4.5 επηρεάζει σαφώς την παράμετρο $E1$ ως προς τη θερμοκρασία.

- ο Παράμετρος **TETA** (Temperature Dependence of ETA)

$TETA = 6.25m$



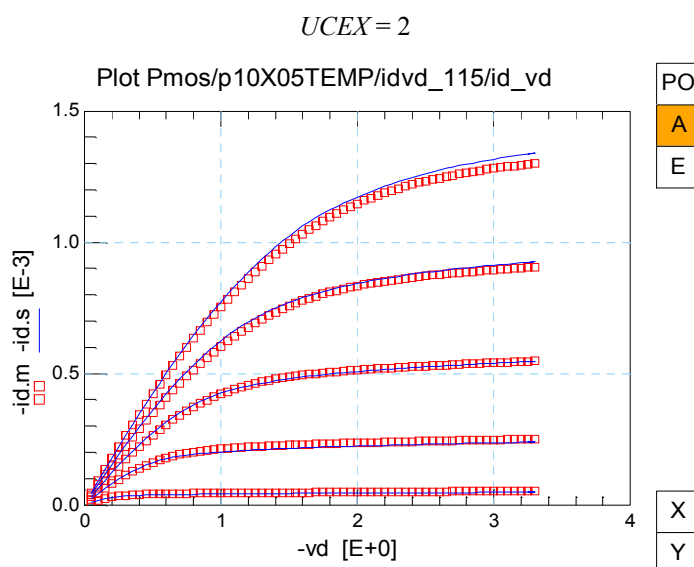
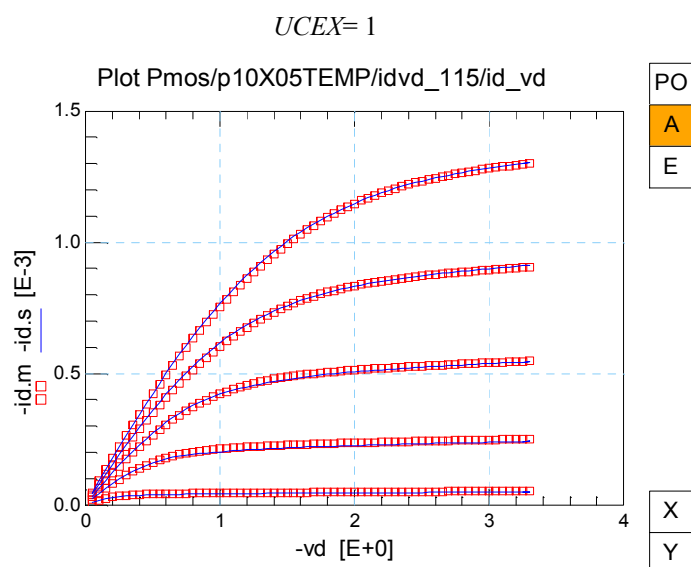
$TETA = 2.25m$



Φαίνεται η μεταβολή της επίδρασης της θερμοκρασίας στη μείωση της παραμέτρου $TETA$ από 6.25m σε 2.25m. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στην μείωση της κινητικότητας λόγω κάθετου πεδίου (ETA).

4.5.2 Παράμετροι Θερμοκρασίας για τρανζίστορ wide-short(10x0.5um)

ο Παράμετρος **UCEX** (Temperature Dependence of *UCRIT*)

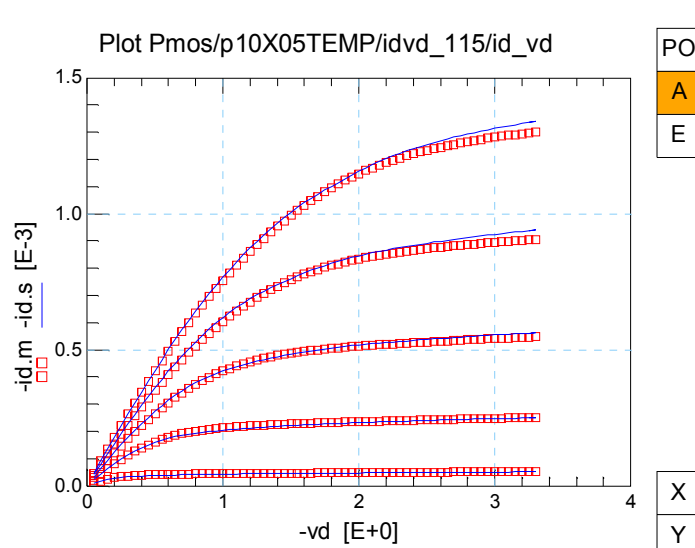
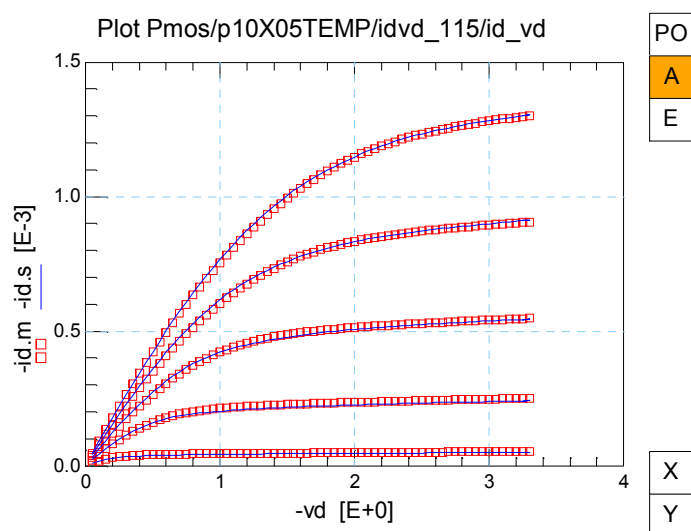


Είναι φανερή, απο τις παραπάνω γραφικές, η επίδραση του διπλασιασμού της τιμής της παραμέτρου UCEX απο 1 σε 2. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στη επίδραση της θερμοκρασίας στη κρίσιμη ταχύτητα των ηλεκτρονίων(UCRIT).

ο Παράμετρος **TLAMBDA** (Temperature Dependence of *LAMBDA*)

$TLAMBDA = 200m$

$TLAMBDA = 800m$



Παραπάνω φαίνεται η επίδραση στη μεταβολή της θερμοκρασίας στην παραμέτρο LAMBDA. Η αύξηση της παραμέτρου TLAMBDA απο 200m σε 800m είναι φανερή σε ένα Pmos Wide-Short τρανζίστορ διαστάσεων 10x0.5.

4.6 Μετρήσεις και εξαγωγή παραμέτρων για τις Διόδους του Μοντέλου

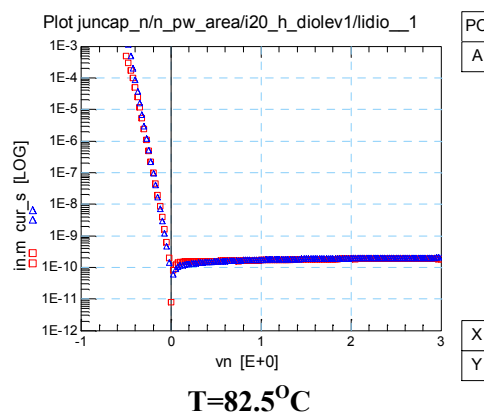
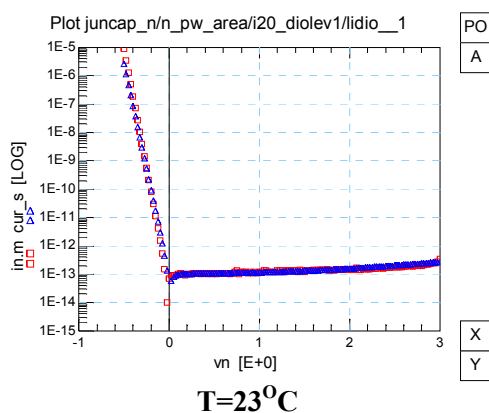
Οι μετρήσεις των ρευμάτων, των χωρητικοτήτων καθώς και την επίδραση της θερμοκρασίας στις διόδους που βρίσκονται και υπάρχουν στο extrinsic μέρος του Mosfet τρανζίστορ, μας διατέθηκαν ουτως ώστε να πραγματοποιήσουμε την εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου για αυτές.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες στις μετρήσεις: καταρχάς διαχωρισμός σε **n-pw**(n-p well), και σε **p-nw**(p-n well) junction. Κάθε κατηγορία απο αυτές μελετάται απο δυο σκοπιές η καθεμιά. Η πρώτη είναι εκείνη που αναφέρεται στο εμβαδό της διόδου (*AREA*), το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο της περιμέτρου της, και δεύτερη σκοπιά είναι το αντίθετο. Δηλαδή μελέτη της διόδου, με περίμετρο μεγαλύτερη σε τάξη μεγέθους απο το εμβαδόν της (*PERI*).

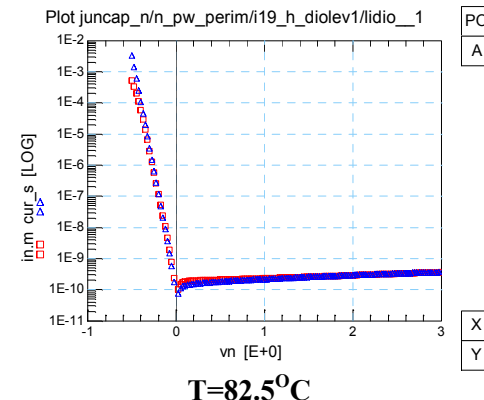
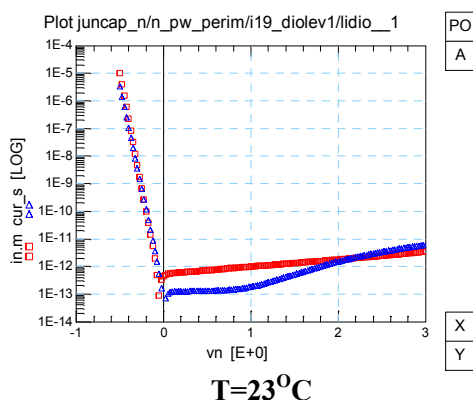
A. Μετρήσεις I-V για τις διόδους του *EKV301.02* μοντέλου

1) n—pw

ο *AREA* (*AREA 50.05n*, *PERI 986 u*)

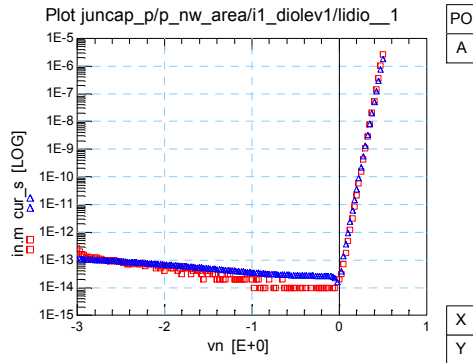


ο *PERIMETER* (*AREA 49.64n*, *PERI 47.49m*)

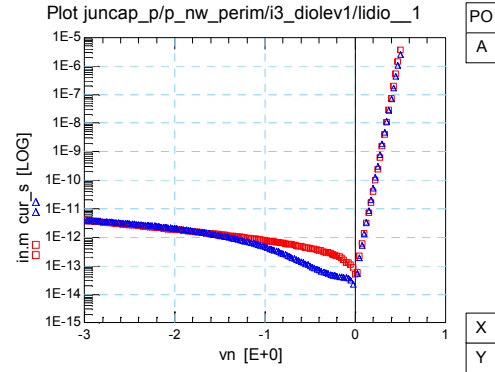


2) p_nw

A) AREA (AREA 50.05n, PERI 986u)

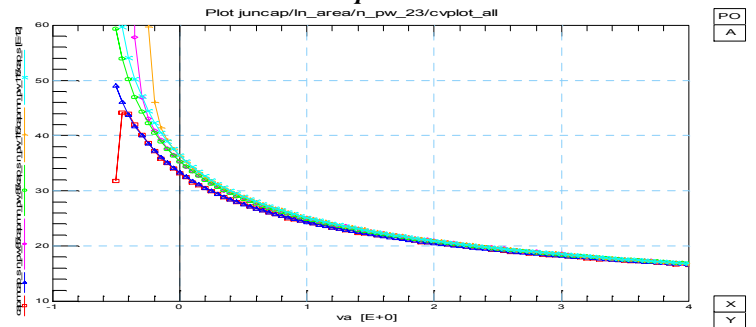
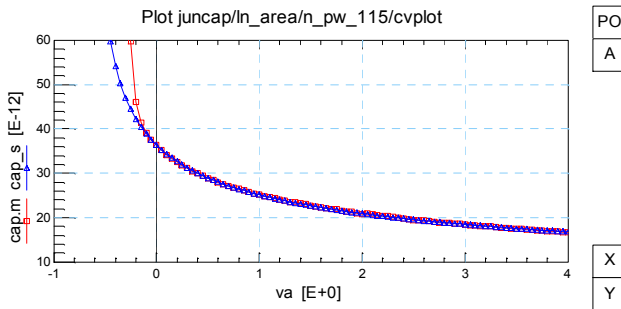
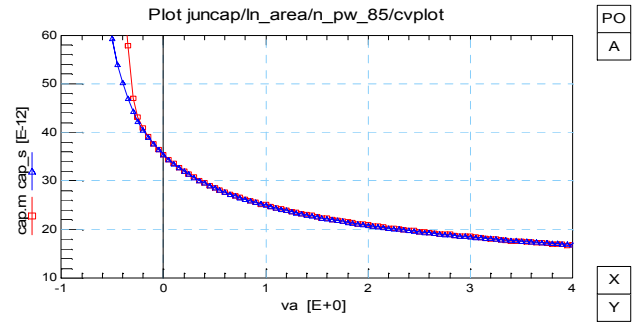
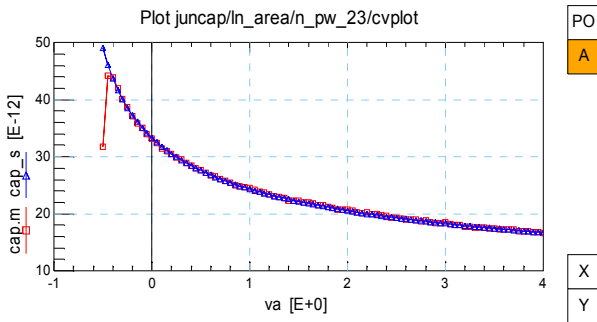


B) PERIMETER (AREA 49.64n, PERI 47.49m)

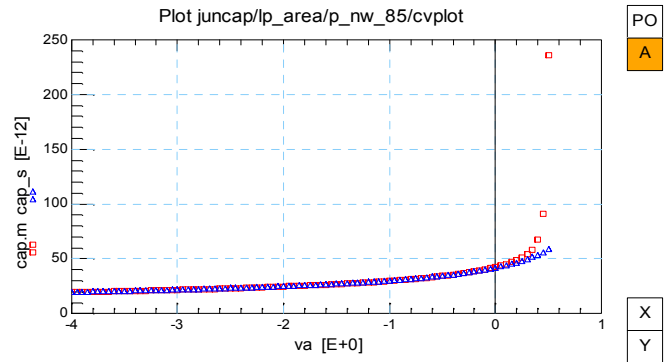
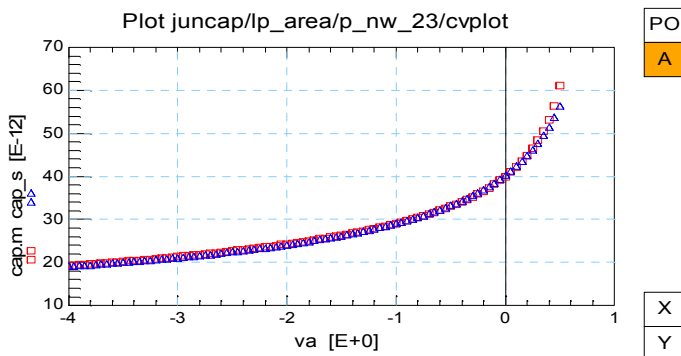


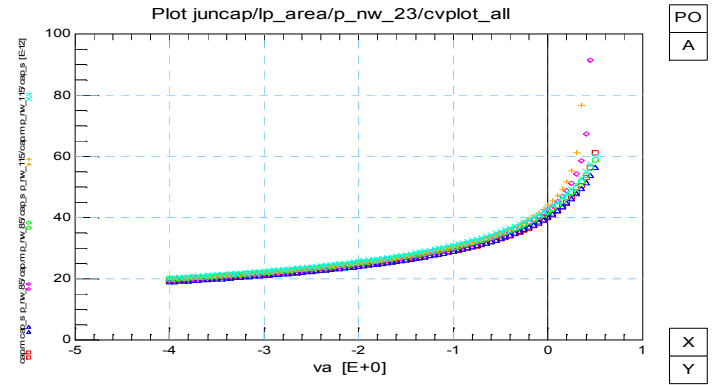
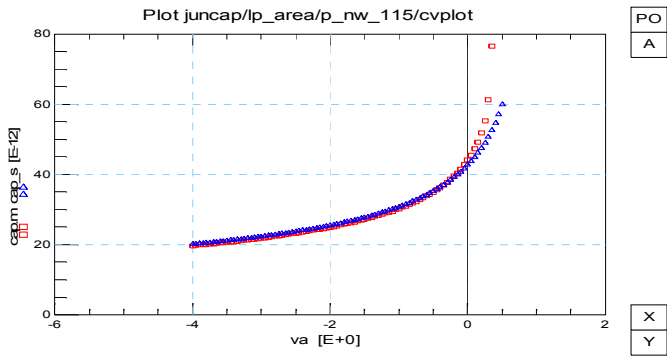
B. Μετρήσεις C-V για τις διόδους του EKV301.02 μοντέλου

o AREA NMOS

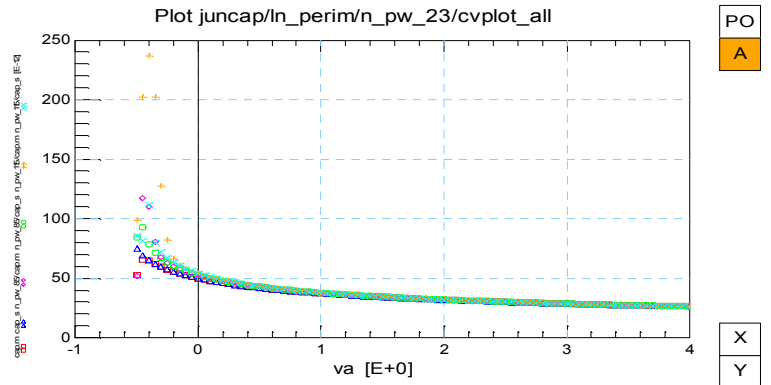
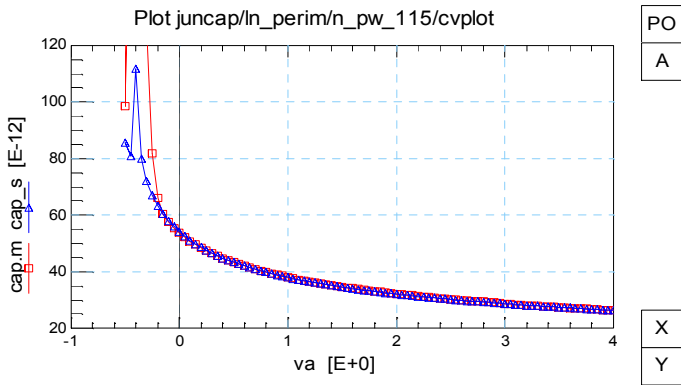
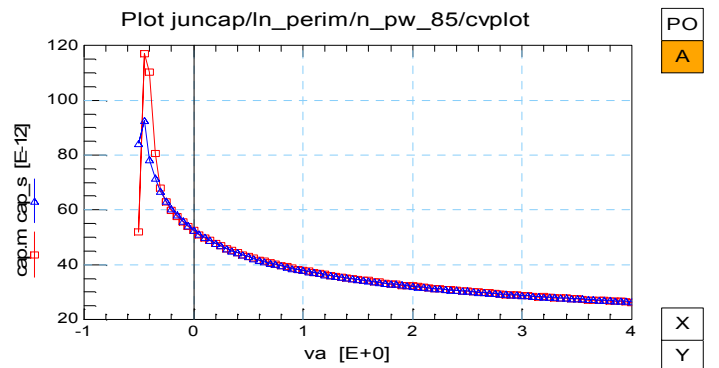
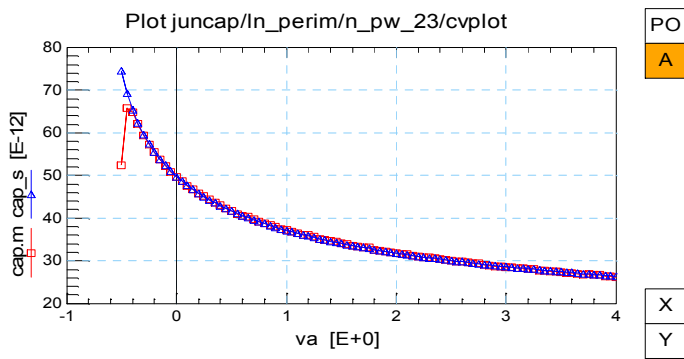


o AREA PMOS

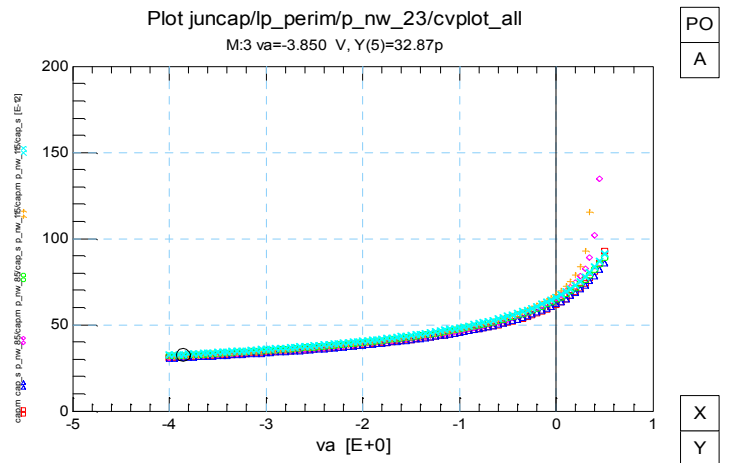
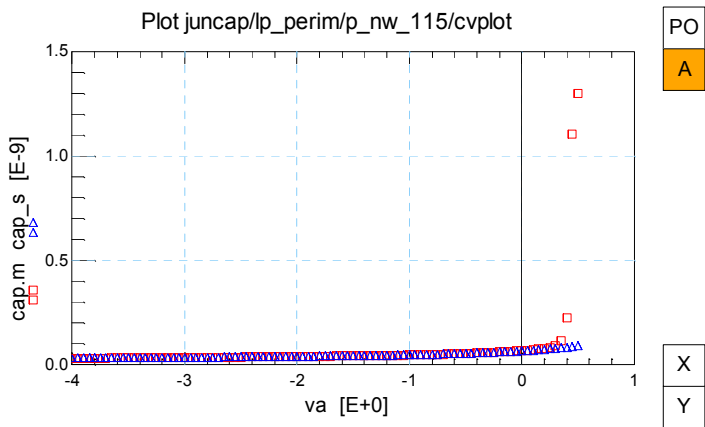
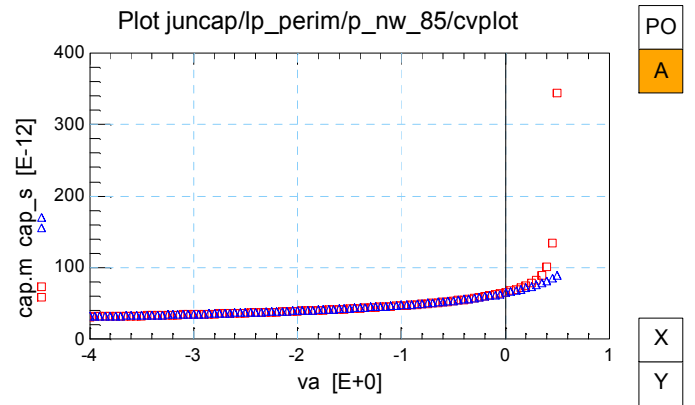
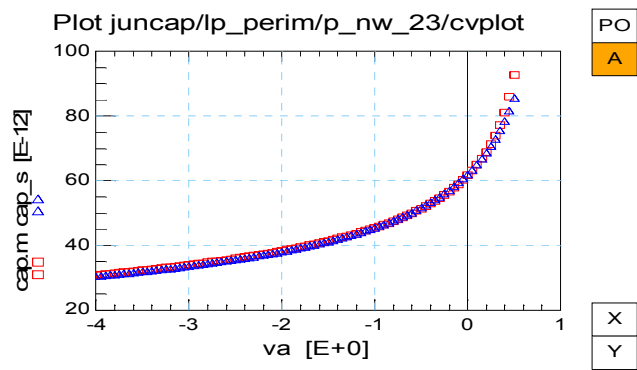




o PERIMETER NMOS



0 Perimeter Pmos

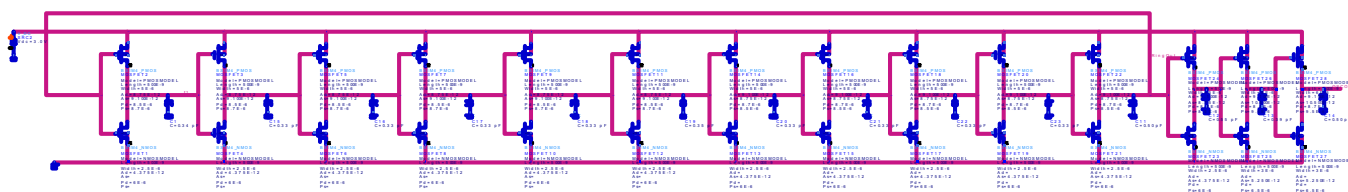


5 Ο κυκλικός ταλαντωτής του κυκλώματος (ring oscillator)

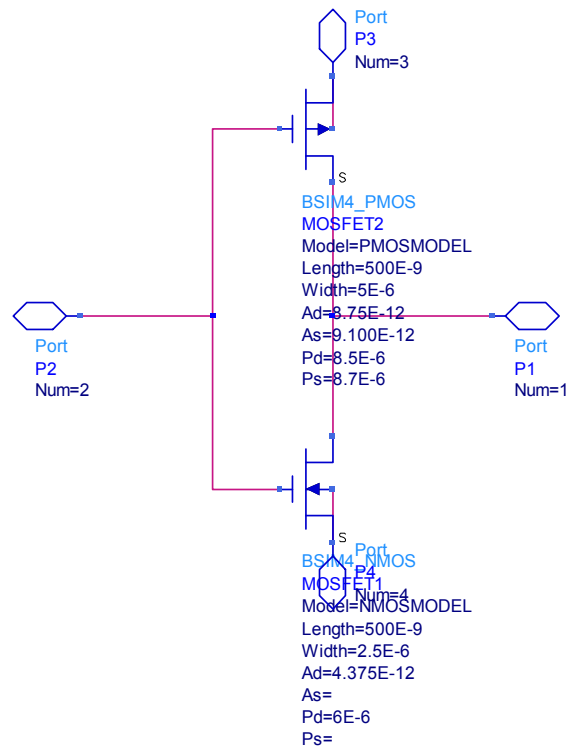
Μετά την ολοκλήρωση της εξαγωγής των παραμέτρων του μοντέλου, επόμενο και τελευταίο κατά σειρά στάδιο είναι η κυκλωματική προσομείωση. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για να σχεδιαστεί το ψηφιακό μας κύκλωμα είναι το **ADS** (*Advanced Design System*). Πάνω στον προσομοιωτή του ADS είναι βασισμένο και το το πρόγραμμα IC-CAP πάνω στο οποίο στηριχτήκαμε για να κάνουμε εξαγωγή του μοντέλου EKV301.02 στην τεχνολογία 0.5um.

Το αναλογικό κύκλωμα το οποίο σχεδιάσαμε είναι ένας **κυκλικός ταλαντωτής 11 σταδίων** (*ring oscillator*), του οποίου το κάθε στάδιο αποτελείται από έναν αντιστροφέα, συνολικά δηλαδή 11 αντιστροφείς σε σειρά, του οποίου το κάθε στάδιο τροφοδοτεί το επόμενο και τροφοδοτείται από το προηγούμενό του. Έξοδος του κυκλώματος θα είναι η έξοδος του τελευταίου σταδίου, η οποία και θα είναι είσοδος στο αρχικό. Μετά το τελευταίο στάδιο, είναι σχεδιασμένος ένας buffer, αποτελούμενος από τρεις αναστροφείς, που σκοπό έχει την ενίσχυση του σήματος εξόδου του ταλαντωτή.

Στα παρακάτω σχήματα, φαίνετα η υλοποίηση του κυκλώματος. Παραθέτουμε το schematic μέρος της υλοποίησης στο ADS.



Σχ. 5.1: Ο κυκλικός ταλαντωτής (ring oscillator) των 11 σταδίων, αποτελούμενος από ισάριθμους αναστροφείς.

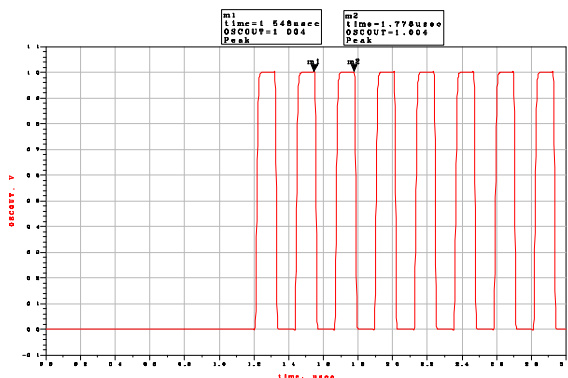


Σχ. 5.2: Κάθε ένα από τα 11 στάδια του κυκλώματος. Ο αντιστροφέας, αποτελούμενος από ένα Nmos και ένα Pmos τρανζίστορ

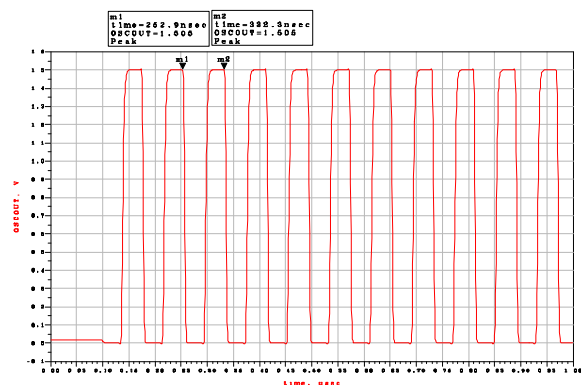
Σκοπός της υλοποίησης αυτής είναι να επιβεβαιώσουμε την ορθή λειτουργία της εξαγωγής παραμέτρων που πραγματοποιήσαμε για την τεχνολογία 0.5um. Αυτό θα γίνει αν το κύκλωμα του ring oscillator πραγματοποιεί ταλάντωση, και έπειτα να συγκριθεί η συχνότητα της ταλάντωσης αυτής με την μετρημένη on wafer συχνότητα ταλάντωσης του ring oscillator τεχνολογίας 0.5um.

Οι προσομοιώσεις του κυκλώματος στις διάφορες τάσεις πόλωσης του ταλαντωτή φαίνονται στις γραφικές που ακολουθούν.

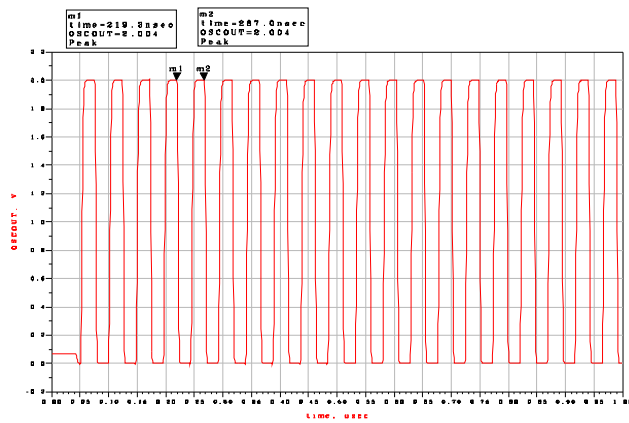
$$V_{dd} = 1V$$



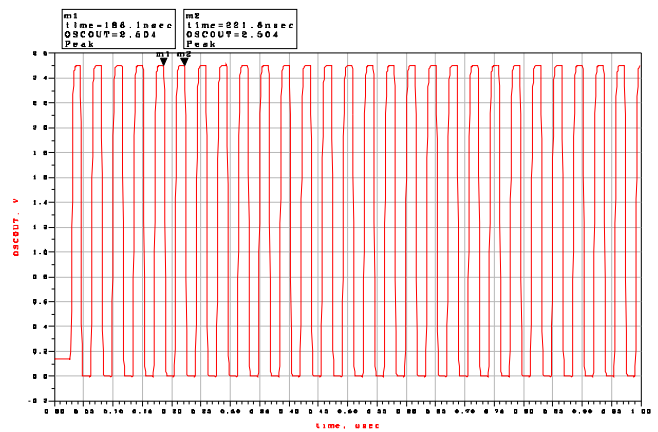
$$V_{dd} = 1.5V$$



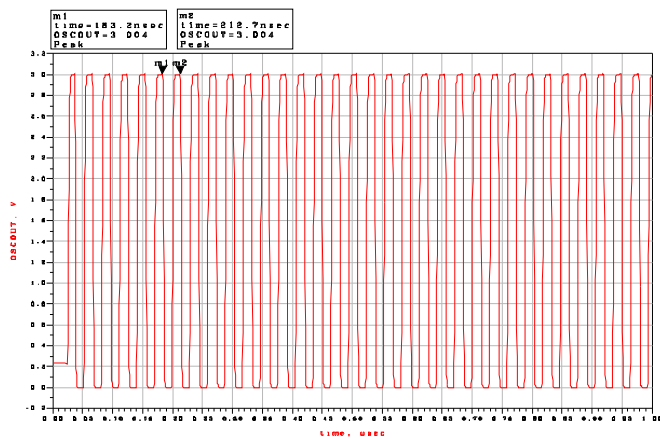
$V_{dd} = 2V$



$V_{dd} = 2.5V$



$V_{dd} = 3V$



Vdd	Period	Period*128
1,0	230,0	29440,0
1,5	79,5	10176,0
2,0	48,0	6144,0
2,5	36,0	4608,0
3,0	29,5	3776,0
3,3	27,0	3456,0
3,5	26,0	3328,0
[V]	[ns]	[ns]

Πίνακας 5.1: Περίοδος ταλάντωσης ring oscillator 0.5um για διάφορες τάσεις πόλωσης

Πιθανά λάθη και παραλείψεις που έχουν γίνει μέχρι τώρα θα φανούν από τα αποτελέσματα προσομείωσης του ταλαντωτή. Πιθανόν να χρειαστεί κάποια αναπροσαρμογή στις παραμέτρους του extrinsic μοντέλου και συγκεκριμένα στις χωρητικότητες των τρανζίστορ, ούτως ώστε να επιτύχουμε καλή κυκλωματική λειτουργία.

6 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν με το πέρας αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι πολλά και ιδιαίτερα σημαντικά και χρήσιμα. Το γεγονός ότι πιστοποιήσαμε την εγκυρότητα του EKV301.02 μοντέλου στη γενιά της 0.5um CMOS τεχνολογίας μελετώντας το διεξοδικά, καθιστά την εργασία αυτή σημαντική. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις των πειραματικών δεδομένων με ένα συνεχές μοντέλο, όπως είναι το EKV301.02, προσδίδουν ιδιαίτερη εμπειρία κατά τη διεξαγωγή και την εξέλιξη της διπλωματικής. Η απόδειξη ότι το EKV301.02 είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο, το οποίο καλύπτει μια πληθώρα φαινομένων όπως οι προσομοιώσεις τάσης-ρεύματος, οι προσομοιώσεις χωρητικότητας που αναπτύσσονται στα τρανζίστορ αλλά και παραμέτρων θερμοκρασίας, και μάλιστα σε όλες τις περιοχές λειτουργίας τους είναι κάτι το εξαιρετικά ενδιαφέρον και ιδιαίτερα σημαντικό για τη επιστήμη της σχεδίασης αναλογικών κυκλωμάτων.

Όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις που παρατέθηκαν, μπορούμε να πούμε πως η προσαρμογή του μοντέλου πάνω στα εργαστηριακά δεδομένα που είχαμε ήταν κάτι παραπάνω από επιτυχής. Σπουδαίο ρόλο στην επιτυχία αυτή έπαιξε η χρήση ενός μοντέλου συνεχούς για τα τρανζίστορ, όπως το EKV3, το οποίο μας επέτρεψε να κινούμαστε γραμμικά σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του. Μέχρι τώρα κανένα άλλο μοντέλο δεν έδινε την ευχέρεια αυτή με αποτέλεσμα η δημιουργικότητα των σχεδιαστών αναλογικών κυκλωμάτων να περιορίζεται στα στενά όρια της ισχυρής αναστροφής.

Σίγουρα επιδέχονται πολλές βελτιώσεις ακόμη στην εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου και πιο συγκεκριμένα στην πόβλεψη των short-channel C-V χαρακτηριστικών των τρανζίστορ. Πιθανή μελλοντική σύγκριση του μοντέλου EKV3 με άλλα μοντέλα όπως το BSIM3v3, το BSIM4, το PSP θα ήταν κάτι πολύ καλό να γίνει και να επιβεβαιωθεί η ανωτερότητά του EKV3 κατά τα προβλεπόμενα. Τέλος, το να πραγματοποιηθούν εργαστηριακές μετρήσεις χωρητικότητας, θερμοκρασίας και συχνότητας ταλάντωσης του κυκλώματος on wafer θα ήταν σημαντικό ούτως ώστε να επιβεβαιωθεί και η ορθότητα της διαδικασίας που ακολουθήσαμε.

Δε θα πρέπει να παραληφθεί και να υποβαθμιστεί το γεγονός ότι η ταλάντωση που προκαλεί το κύκλωμα του κυκλικού ταλαντωτή με το δικό μας σετ παραμέτρων τεχνολογίας 0.5um, δίνει πολλά πολύτιμα συμπεράσματα από την μελέτη της εργασίας αυτής στους σχεδιαστές των αναλογικών κυκλωμάτων αλλά και στην εκπαιδευτική κοινότητα.

7 Αναφορές

- [1] W. Grabinski, T. Grasser, G. Gildenblat, G.-J. Smit, M. Bucher, A. Aarts, A. Tajic, Y. S. Chauhan, A. Napieralski, T.-A. Fjeldly, B. Iñiguez, G. Iannacone, M. Kayal, W. Posch, G. Wachutka, F. Prégaldiny, C. Lallement, L. Lemaître, „MOS-AK: Open Compact Modeling Forum“, *Proc. 4th Int. Workshop on Compact Modeling*, pp. 1-11, Yokohama, Japan, January 23, 2007.
- [2] C. C. Enz, F. Krummenacher, E. A. Vittoz, “An Analytical MOS Transistor Model Valid in All Regions of Operation and Dedicated to Low-Voltage and Low-Current Applications”, *J. Analog Int. Circ. Signal Processing*, Vol. 8, pp. 83-114, 1995.
- [3] A. Bazigos, M. Bucher, F. Krummenacher “EKV301.02 model documentation”, 2008.
- [4] A. Bazigos, M. Bucher, “The EKV3.0 Model Code and Parameter Extraction“, *EKV Model Users’ Group Meeting and Workshop*, [Available Online:] <http://legwww.epfl.ch/ekv/workshop>, EPFL, Lausanne, Switzerland, November 4-5, 2004.
- [5] S. C. Terry, J. M. Rochelle, D. M. Binkley, B. J. Blalock, D. P. Foty, M. Bucher, “Comparison of a BSIM3v3 and EKV MOST Model for a 0.5um CMOS Process and Implications for Analog Circuit Design”, *IEEE Trans. on Nuclear Sciences*, Vol. 50, N° 8, pp. 915-920, August 2003.
- [6] M. Bucher, “Analytical MOS Transistor Modelling for Analog Circuit Simulation”, Ph. D. Thesis N° 2114 (1999), Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), Switzerland, 2000.
- [7] M. Bucher, A. Bazigos, F. Krummenacher, J.-M. Sallese, C. Enz, “EKV3.0: An Advanced Charge Based MOS Transistor Model”, in W. Grabinski, B. Nauwelaers, D. Schreurs (Eds.), *Transistor Level Modeling for Analog/RF IC Design*, pp. 67-95, Springer, ISBN 1-4020-4555-7, 2006.
- [8] C. C. Enz, E. A. Vittoz, “Charge-Based MOS Transistor Modeling – The EKV Model for low-power and RF IC Design”, Willey, 2006

Παράρτημα Ι

I.1 Instance Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
L	10.0E-06	Gate Length
W	10.0E-06	Gate Width
NF	1	Number of Fingers
M	1	Multiplicity Factor
AS	0	Source Active Area
AD	0	Drain Active Area
PS	0	Source Active Perimeter
PD	0	Drain Active Perimeter
SA , SB	0 , 0	Distance from STI

I.2 Model Parameters

I.2.1 Flags and Setup Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
SIGN	1	Type of MOSFET: 1 for NMOS, -1 for PMOS
TG	-1	Type of Gate: -1 for opposite than bulk, 1 for same with bulk, 0 for no polysilicon depletion effect
TNOM	27	Nominal Temperature (in Celsius degrees)
SCALE	1	Scaling Factor for Gate Length and Width
XL	0	Optical offset for Gate Length
XW	0	Optical offset for Gate Width
TH_NOI	1	Thermal noise flag (on/off). Includes short channel effects but no gate induced noise
NQS_NOI	0	NQS noise flag (on/off). Includes thermal noise with no short channel effects

I.2.2 Matching Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
AVTO	0	Matching Parameter for Threshold Voltage
AGAMMA	0	Matching Parameter for Body Effect Coefficient
AKP	0	Matching Parameter for Mobility

I.2.3 Oxide, Substrate and Gate Doping related Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
COX	0.012	Oxide Capacitance per unit Area
XJ	20.0E-09	Depth of Active Areas
VTO	0.3	Threshold Voltage
PHIF	0.45	Bulk Fermi Potential
GAMMA	0.3	Body Effect Coefficient

GAMMAG	4.1	Body Effect Coefficient for Gate
N0	1	Long Channel Slope Factor Fine Tuning
VBI	0	Built-in Voltage Drop

I.2.4 Quantum Effects

Parameter Name	Default Value	Short Description
AQMA	0.5	Quantum Effect Coefficient for Accumulation Region
AQMI	0.4	Quantum Effect Coefficient for Inversion Region
ETAQM	0.75	Quantum Effect Factor

I.2.5 Mobility and Vertical field Mobility Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
KP	500E-06	Mobility multiplied by COX
E0	1.0E+10	First Order Coefficient for Mobility Reduction due to Vertical Field
E1	3.1E+08	Second Order Coefficient for Mobility Reduction due to Vertical Field
ETA	0.5	Mobility Reduction due to Vertical Field Factor

I.2.6 Coulomb Scattering

Parameter Name	Default Value	Short Description
ZC	1.0E-6	Coulomb Scattering coefficient
THC	0	Coulomb Scattering coefficient

I.2.7 Mobility Length and Width Dependence

Parameter Name	Default Value	Short Description
LA	1.0	First critical length for mobility length scaling
LB	1.0	Second critical length for mobility length scaling
KA	0.0	First factor for mobility length scaling
KB	0.0	Second factor for mobility length scaling
WKP1	1.0E-6	Width parameter for mobility profile vs. width
WKP2	0.0	Amplitude parameter for mobility profile vs. width
WKP3	1.0	Span parameter for mobility profile vs. width

I.2.8 Geometrical Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
DL	-10.0E-9	Effective Length Parameter
DLC	0	Effective Length Parameter for Capacitance
DW	-10.0E-9	Effective Width Parameter
DWC	0	Effective Width Parameter for Capacitance
WDL	0	Width Dependence of Effective Length
LDW	0	Length Dependence of Effective Width
LL	0	Base for Exponential Dependence of Effective Length
LLN	1	Exponent for Exponential Dependence of Effective Length

I.2.9 Long and Wide Channel Correction for Threshold Voltage and Body Effect Coefficient Correction

Parameter Name	Default Value	Short Description
AVT	0.0	Amplitude for long and wide channel threshold voltage correction
LVT	1.0	Length for long and wide channel threshold voltage correction
WVT	1.0	Width for wide channel threshold voltage correction
AGAM	0.0	Amplitude for long and wide channel body effect coefficient correction
LGAM	1.0	Length for long channel body effect coefficient correction
WGAM	1.0	Width for wide channel body effect coefficient correction
NFVTA	0.0	Number of figners parameter for threshold voltage dependence on NF
NFVTB	10000.0	Factor for threshold voltage dependence on NF

I.2.10 Velocity Saturation and Channel Length Modulation

Parameter Name	Default Value	Short Description
UCRIT	5.0E+06	Critical Velocity of Electrons
LAMBDA	0.5	Early effect factor
DELTA	2.0	Order of velocity saturation model(variable order model 1~2)
ACLM	0.83	Channel Length Modulation Factor

I.2.11 Reverse Short Channel Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
LR	50.0E-9	Length Factor for RSCE
QLR	0.5E-3	Threshold Voltage Factor of RSCE
NLR	10.0E-3	Body Effect Coefficient Factor of RSCE
FLR	0	Bulk Fermi Potential of RSCE

I.2.12 Charge Sharing Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
LETA	500.0E-3	Short Channel Charge Sharing Coefficient
LETA0	0	Long Channel Charge Sharing Coefficient
LETA2	0	Short Channel Scaling Coefficient
WETA	200.0E-3	Narrow Channel Charge Sharing Coefficient
NCS	1.0	Slope Factor Dependence from Charge Sharing

I.2.13 Drain Induced Barrier Lowering

Parameter Name	Default Value	Short Description
ETAD	1.0	DIBL Coefficient
SIGMAD	1.0	Secondary DIBL Coefficient

I.2.14 Inverse Narrow Width Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
WR	90.0E-09	Width Factor for INWE
QWR	0.3E-3	Threshold Voltage Factor of INWE
NWR	5.0E-3	Body Effect Coefficient Factor of INWE

I.2.15 Drain Induced Threshold Shift

Parameter Name	Default Value	Short Description
FPROUT	1.0E+6	Output resistance for DITS effect
PDITS	0.0	DITS parameter
PDITSL	0.0	DITS dependence on length
PDITSD	1.0	DITS dependence on drain bias
DDITS	0.3	Smooth factor of DITS effect

I.2.16 Impact Ionization Current

Parameter Name	Default Value	Short Description
IBA	000.0E+06	Impact Ionization Current first parameter
IBB	300.0E+06	Impact Ionization Current second parameter
IBN	1.0	Impact Ionization Current coefficient

I.2.17 Gate Current

Parameter Name	Default Value	Short Description
XB	3.1	Silicon to Silicon oxide tunnelling barrier height
EB	29.0E+09	Characteristic electrical field
KG	00.0E-6	Mobility for Gate Current
LOVIG	20.0E-9	Overlap Length for Gate current

I.2.18 Gate Induced Drain and Source Leakage

Parameter Name	Default Value	Short Description
AGIDL	0.0	First GIDL parameter
BGIDL	2.3E+09	Second GIDL parameter
CGIDL	0.5	Third GIDL parameter
DGIDL	0.8	Fourth GIDL parameter

I.2.19 Edge Conductance Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
WEDGE	0.0	Width of edge conduction area
DGAMMAEDGE	0.0	Difference of body effect coefficient of edge conduction area with respect to the main part of the channel
DPHIEDGE	0.0	Difference of Fermi potential of edge conduction area with respect to the main part off the channel

I.2.20 STI Stress Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
SAREF	0.0	Reference distance from STI, for SA
SBREF	0.0	Reference distance from STI, for SB
WLOD	0.0	Width of common area between device and STI
KKP	0.0	Mobility dependence on STI
LKKP	0.0	Length scaling of mobility dependence on STI
WKKP	0.0	Width scaling of mobility dependence on STI
PKKP	0.0	Area scaling(fine tuning for short and narrow channel devices)of Mobility dependence on STI
TKKP	0.0	Temperature scaling of mobility dependence on STI
LLODKKP	1.0	Exponent of length scaling of mobility dependence on STI
WLODKKP	1.0	Exponent of width scaling of mobility dependence on STI
KVTO	0.0	Threshold voltage dependence on STI
LKVTO	0.0	Length scaling of threshold voltage dependence on STI
WKVTO	0.0	Width scaling of threshold voltage dependence on STI
PKVTO	0.0	Area scaling(fine tuning for short and narrow channel devices)of Threshold voltage dependence on STI
LLODKVTO	1.0	Exponent of length scaling of threshold voltage dependence on STI
WLODKVTO	1.0	Exponent of width scaling of threshold voltage dependence on STI

I.2.21 Flicker Noise

Parameter Name	Default Value	Short Description
KF	0.0	Flicker noise factor
AF	1.0	Frequency exponent for flicker noise
EF	2.0	Transconductance exponent for flicker noise
KGFN	0.0	Gate flicker noise factor

I.2.22 Length Scaling Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
LQWR	0.0	Length scaling of QWR
LNWR	0.0	Length scaling of NWR
LWR	0.0	Length scaling of LWR
LDPHIEDGE	0.0	Length scaling of DPHIEDGE

I.2.23 Width Scaling Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
WQLR	0.0	Width scaling of QLR
WQLR	0.0	Width scaling of QLR
WLR	0.0	Width scaling of LR
WUCRIT	0.0	Width scaling of UCRIT
WLAMBDA	0.0	Width scaling of LAMBDA

WETAD	0.0	Width scaling of ETAD
WE0	0.0	Width scaling of E0
WE1	0.0	Width scaling of E1
WRLX	0.0	Width scaling of RLX
WUCEX	0.0	Width scaling of UCX
WDPHIEDGE	0.0	Width scaling of DPHIEDGE

I.2.24 Short and Narrow Channel Fine Tuning Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
WLDPHIEDGE	0.0	Area scaling(fine tuning for short and narrow)of DPHIEDGE
WLDGAMMA EDGE	0.0	Area scaling(fine tuning for short and narrow)of DGAMMAEDGE

I.2.25 Temperature Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
TETA	-0.9E-3	Temperature dependence of ETA
TLAMBDA	0.0	Temperature dependence of LAMBDA
TCV	600.0E-6	Temperature dependence of VTO (threshold voltage)
BEX	-1.5	Temperature dependence of KP (mobility)
UCX	1.5	Temperature dependence of UCRIT
TE0EX	0.5	Temperature dependence of E0
TE1EX	0.5	Temperature dependence of E1
IBBT	800.0E-6	Temperature dependence of IBB

I.2.26 Geometry Dependencies of Temperature Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
TCVL	0.0	Length dependence of TCV
TCVW	0.0	Width dependence of TCV
TCVWL	0.0	Area dependence of TCV

I.3 Extrinsic Part of the Model

I.3.1 Overlap Capacitances

Parameter Name	Default Value	Short Description
GAMMAOV	1.6	Body effect coefficient of the overlap area
GAMMAGOV	10.0	Body effect coefficient of the gate of the overlap area
VFBOV	0.0	Flat-band voltage of the overlap area
LOV	20.0E-9	Length of the overlap area
VOV	1.0	
CGSO	0.0	Bias-independent gate to source overlap capacitance
CGDO	0.0	Bias-independent gate to drain overlap capacitance
CGBO	0.0	Bias-independent gate to bulk overlap capacitance

I.3.2 Fringing Capacitances

Parameter Name	Default Value	Short Description
KJF	0.0	Fringing capacitance factor
CJF	0.0	Fringing capacitance bias factor
VFR	0.0	Built-in correction for fringing capacitance
DFR	1.0E-3	Smooth factor of fringing capacitance model

I.3.3 Series Resistances

Typical Spice Model

Parameter Name	Default Value	Short Description
HDIF	0.0e-6	Half length of active area
RSH	0.0	Square resistance of active area
LDIF	0.0	Distance between the middle of the active area and the start of the channel
RS	0.0	LDD Source series resistance
RD	0.0	LDD Drain series resistance

Non-Geometrical Approach

Parameter Name	Default Value	Short Description
RLX	-1.0	Series resistance (symmetric model)
RSX	-1.0	Source series resistance(asymmetric model)
RDX	-1.0	Drain series resistance(asymmetric model)
RGX	-1.0	Gate series resistance(asymmetric model)
RBX	-1.0	Bulk series resistance(asymmetric model)

I.3.4 Temperature Scaling of Extrinsic Resistors

Parameter Name	Default Value	Short Description
TR	0.0	First order temperature coefficient of resistors
TR2	0.0	Second order temperature coefficient of resistors

I.3.5 Junction Diodes Drain-Bulk and Source-Bulk: Current and Capacitance

Parameter Name	Default Value	Short Description
ND	1.0	Slope factor for parasitic diodes
JS	0.0E-09	Area component of diode current
JSW	0.0E-12	Perimeter component of diode current
JSWG	0.0E-12	Gate side component of diode current
MJ	0.900	Area exponent of diode capacitance
MJSW	0.700	Perimeter exponent of diode capacitance
MJSWG	0.700	Gate side exponent of diode capacitance
PB	0.800	Area parameter of diode capacitance
PBSW	0.600	Perimeter parameter of diode capacitance
PBSWG	0.600	Gate side parameter of diode capacitance

CJ	0.0E-06	Area component of diode capacitance
CJSW	0.0E-09	Perimeter component of diode capacitance
CJSWG	0.0E-09	Gate side component of diode capacitance
GMIN	0.0	Minimum conductance of diode
XJBV	0.0	Break down effect coefficient
BV	10.0	Breakdown Voltage
XTI	3.0	Temperature dependence of diode
TCJ	0.0	Temperature dependence of CJ
TCJSW	0.0	Temperature dependence of CJSW
TCJSWG	0.0	Temperature dependence of CJSWG
TPB	0.0	Temperature dependence of PB
TPBSW	0.0	Temperature dependence of PBSW
TPBSWG	0.0	Temperature dependence of PBSWG
JTS	0.0E-09	Area component of trap-assisted diode current
JTSW	0.0E-12	Perimeter component of trap-assisted diode current
JTSWG	0.0E-12	Gate side component of trap-assisted diode current
XTS	0.0	Area component of temperature dependence of trap-assisted diode current
XTSW	0.0	Perimeter component of temperature dependence of trap-assisted diode current
XTSWG	0.0	Gate side component of temperature dependence of trap-assisted diode current
NJTS	1.0	Area slope factor of trap-assisted diode current
NJTSSW	1.0	Perimeter slope factor of trap-assisted diode current
NJTSSWG	1.0	Gate side slope factor of trap-assisted diode current
VTSS	0.0	Area voltage factor of trap-assisted diode current
VTSSW	0.0	Perimeter voltage factor of trap-assisted diode current
VTSSWG	0.0	Gate side voltage factor of trap-assisted diode current
TNJTSS	0.0	Temperature dependence of NJTSS
TNJTSSW	0.0	Temperature dependence of NJTSSW
TNJTSSWG	0.0	Temperature dependence of NJTSSWG

I.3.6 Gate and Substrate Resistances

Parameter Name	Default Value	Short Description
RGSH	3.0	Gate square resistance
GC	1	Gate contacts(single sided=1,double sided=2)
RDSBSH	1.0E+3	Type of guard ring (bulk contacts)(two sides/symetric:1, three sides/horse shoe:2)
RBWSH	3.0E-3	Drain to source substrate sheet resistance
RBN	0.0	Inner bulk to bulk sheet resistance
RSBWSH	1.0E-3	Inner bulk to bulk resistance per finger(for RINGTYPE=2)
RSBN	0.0	Inner bulk-source side to bulk sheet resistance
RDBWSH	1.0E-3	Inner bulk-source side to bulk resistance per finger(for RINGTYPE=2)
RDBN	0.0	Inner bulk-drain side to bulk sheet resistance
RINGTYPE	1.0	Inner bulk-drain side to bulk resistance per finger(for RINGTYPE=2)

Παράρτημα II

Extended validation of EKV3 compact model for a 0.5um CMOS technology

Στο παράρτημα II θα παραθέσουμε τα setup που δημιουργήθηκαν για να μπορέσει να μετρηθεί η τεχνολογία 0.5um στον εργαστηριακό χώρο. Στο τέλος του παραρτήματος, θα δοθούν ολοκληρωμένα τα σεντ των παραμέτρων καθώς και οι μεταβολές στις τιμές τους κατά τη διαδικασία της εξαγωγής τους για την MOSFET τεχνολογία 0.5um.

Τα *I-V setups* που δημιουργήθηκαν στο ICCAP για τα NMOS και PMOS είναι :

A. Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

- Το setup για **id-vg** μετρήσεις

$$V_d = 3.3 \text{ V},$$

$$V_g = 0\text{V} - 3.3\text{V step } 33\text{mV},$$

$$V_s = 0\text{V} - 1.5\text{V step } 500\text{mV},$$

$$V_b = 0\text{V}$$

- Το setup για **id-vs** μετρήσεις

$$V_d = 3\text{V},$$

$$V_g = 600\text{mV} - 3\text{V step } 800\text{mV},$$

$$V_s = -400\text{mV} - 3\text{V step } 40\text{mV},$$

$$V_b = 0\text{V}$$

- Το setup για **id-vd** μετρήσεις

$$V_d = 50 \text{ mV} - 3.3 \text{ V step } 50\text{mV},$$

$$V_g = 900\text{mV} - 3.3\text{V step } 600\text{mV},$$

$$V_s = 0 \text{ V},$$

$$V_b = 0\text{V}$$

- Το setup για **id-Vgl** μετρήσεις

$$V_d = 50 \text{ mV},$$

$$V_g = 0\text{V} - 3.3\text{V step } 50\text{mV},$$

$$V_s = 0 \text{ V},$$

$$V_b = 0\text{V} - (-1.8\text{V}) \text{ step } -600\text{mV}$$

B. Για τα τρανζίστορ τύπου P (PMOS)

- Το setup για **id-vg** μετρήσεις

$$V_d = -3.3 \text{ V},$$

$$V_g = 0 \text{ V} - (-3.3 \text{ V}) \text{ step } -33 \text{ mV},$$

$$V_s = 0 \text{ V} - (-1.5 \text{ V}) \text{ step } -500 \text{ mV},$$

$$V_b = 0 \text{ V}$$

- Το setup για **id-vs** μετρήσεις

$$V_d = -3 \text{ V},$$

$$V_g = -600 \text{ mV} - (-3 \text{ V}) \text{ step } -800 \text{ mV},$$

$$V_s = 400 \text{ mV} - (-3 \text{ V}) \text{ step } -40 \text{ mV},$$

$$V_b = 0 \text{ V}$$

- Το setup για **id-vd** μετρήσεις

$$V_d = -50 \text{ mV} - (-3.3 \text{ V}) \text{ step } -50 \text{ mV},$$

$$V_g = -900 \text{ mV} - (-3.3 \text{ V}) \text{ step } -600 \text{ mV},$$

$$V_s = 0 \text{ V},$$

$$V_b = 0 \text{ V}$$

- Το setup για **id-Vgl** μετρήσεις

$$V_d = -50 \text{ mV},$$

$$V_g = 0 \text{ V} - (-3.3 \text{ V}) \text{ step } -50 \text{ mV},$$

$$V_s = 0 \text{ V},$$

$$V_b = 0 \text{ V} - 1.8 \text{ V step } 600 \text{ mV}$$

Τα **C-V setups** που δημιουργήθηκαν στο ICCAP για τα NMOS και PMOS είναι :

A. Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

- Το setup για τις μετρήσεις **CGG** (capacitance gate) είναι:

$$V_g = (-5 \text{ V}) - 5 \text{ V step } 100 \text{ mV}$$

- Το setup για τις μετρήσεις **CGS** (capacitance gate-source) είναι:

$$V_g = (-5 \text{ V}) - 5 \text{ V step } 100 \text{ mV}$$

- Το setup για τις μετρήσεις **CGB** (capacitance gate-bulk) είναι:

$$V_g = (-5 \text{ V}) - 5 \text{ V step } 100 \text{ mV},$$

$$V_b = 0 \text{ V}$$

B. Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

- Το setup για τις μετρήσεις **CGG** (capacitance gate) είναι:

$$V_g = (-5V) - 5V \text{ step } 100mV$$

- Το setup για τις μετρήσεις **CGS** (capacitance gate-source) είναι:

$$V_g = (-5V) - 5V \text{ step } 100mV$$

- Το setup για τις μετρήσεις **CGB** (capacitance gate-bulk) είναι:

$$V_g = (-5V) - 5V \text{ step } 100mV,$$

$$V_b = 0V$$

Ακολουθεί το ολοκληρωμένο σέτ παραμέτρων του μοντέλου EKV301.02 για NMOS και PMOS.

	NMOS	PMOS	είδος παραμέτρου
SIGN	1.000	-1.000	i-v param
VTO	530.0m (↓)	-500.0m (↓)	i-v&c-v param
COX	4.000m	3.450m (↓)	i-v&c-v param
XJ	20.00n	20.00n	i-v param
PHIF	480.0m (↓)	410.0m (↓)	i-v&c-v param
GAMMA	710.0m (↓)	660.0m (↓)	i-v&c-v param
GAMMAG	10.50 (↓)	11.80 (↓)	i-v&c-v param
N0	1.025 (↓)	990.0m	i-v param
AQMA	900.0m (↑)	500.0m	i-v&c-v param
AQMI	400.0m	400.0m	i-v&c-v param
ETAQM	9.000 (↑)	750.0m	i-v&c-v param
KP	190.0u	37.00u (↑)	i-v param
E0	350.0MEG (↑)	1.00G	i-v param
E1	240.0MEG (↓)	79.00MEG (↓)	i-v param
ETA	750.0m	313.0m (↓)	i-v param
ZC	1.000u	1.400u	i-v param
FPROUT	26.43K	0.000	i-v param
PDITS	29.51u	0.000	i-v param
PDITSD	52.06u	0.000	i-v param
DDITS	100.0m	0.000	i-v param
LGAM	32.00u	30.00u	i-v param
WGAM	1.000	10.00m	i-v param
DL	-110.0n	-88.00n	Width&length scaling param
DW	50.00n	70.00n (↑)	Width&length scaling param
DLC	99.00n (↑)	-42.00n (↓)	c-v param
RLX	500.0u (↓)	1.370m (↑)	i-v param
RSX	-1.000	0.000 (↑)	i-v param
WDL	50.00f	345.0f	Width&length scaling param
LDW	20.00f	2.00f	Width&length scaling param
LR	30.00n	22.00n	i-v param
QLR	4.200m	1.950m (↓)	i-v param
NLR	2.000m	200.0u	i-v param

FLR	2.000	1.000	i-v param
WR	50.00n	100.00n	Width&length scaling param
QWR	470.0u	-300.0u (↓)	Width&length scaling param
NWR	-6.000m	7.000m	Width&length scaling param
NCS	2.000	1.000	Width&length scaling param
LETA0	0.000	0.000	i-v param
LETA	530.0m (↑)	320.0m (↓)	i-v param
LETA2	0.000	0.000	i-v param
WETA	10.0m	1.700 (↑)	Width&length scaling param
UCRIT	2.800MEG (↓)	6.100MEG (↓)	i-v param
LAMBDA	240.0m (↓)	1.100 (↓)	i-v param
DELTA	1.400 (↑)	1.900	i-v param
ACLM	830.0m	830.0m	i-v param
ETAD	900.00u (↑)	300.0m	i-v param
SIGMAD	1.000	1.000	i-v param
LOV	70.00n (↑)	135.0n (↑)	c-v param
GAMMAOV	1.000 (↓)	5.100 (↑)	c-v param
VFBOV	0.000 (↓)	0.000 (↓)	c-v param
VOV	1.000 (↑)	1.000 (↑)	c-v param
CGSO	0.000 (↓)	0.000	c-v param
CGDO	CGSO (↓)	0.000	c-v param
CGBO	0.000	0.000	c-v param
KJF	350.0p (↑)	30.00p (↑)	c-v param
CJF	10.00m (↑)	1.000 (↑)	c-v param
VFR	180.0m (↑)	0.000	c-v param
DFR	0.000 (↑)	9.000m (↑)	c-v param
WE0	0.000	0.000	Width&length scaling param
WE1	0.00	350.0n	Width&length scaling param
WRLX	-50.00n	-240.0n	Width&length scaling param
WUCRIT	-130.0n	-1.000n	Width&length scaling param
WLAMBDA	800.0n	1.000n	Width&length scaling param
WETAD	0.000	0.000	Width&length scaling param
WUCEX	50.00n	1.000u	Width&length scaling param
WLR	0.0	0.00	Width&length scaling param
WQLR	-120.0n	-650.0n	Width&length scaling param
WNLR	23.00u	-28.00u	Width&length scaling param
LWR	0.0	0.0	Width&length scaling param
LQWR	0.0	0.0	Width&length scaling param
LNWR	-5.500u	0.0	Width&length scaling param
TCV	800.0u	-880.0u	Temperature param
BEX	-1.570	-1.110	Temperature param
TETA	7.500m	6.250m	Temperature param
UCEX	1.500m	1.000	Temperature param
TLAMBDA	50.00m	200.0m	Temperature param
TE0EX	1.200	4.200	Temperature param
TE1EX	2.500	3.000	Temperature param

Πίνακας Ι: Σέτ παραμέτρων τεχνολογίας 0.5um του μοντέλου EKV301.02

Στον παραπάνω πίνακα δίνονται τα σέτ παραμέτρων τεχνολογίας 0.5um για NMOS και PMOS. Οι στήλες αναφέρονται στις παραμέτρους οι οποίες προσαρμόζουν το μοντέλο EKV301.02 σε όλα τα διαθέσιμα δεδομένα που μετρήθηκαν στο εργαστήριο (στις παρενθέσεις φαίνονται οι μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων για την προσαρμογή των C-V γραφικών).

Με πράσινο(—) χρώμα είναι οι κοινές παράμετροι που επηρεάζουν τα I-V και τα C-V δεδομένα ταυτόχρονα.

Με κόκκινο(—) χρώμα είναι οι παράμετροι χωρητικότητας του μοντέλου. Είναι εκείνες που προσαρμόζουν το μοντέλο στις C-V μετρήσεις.

Με μπλέ(—) χρώμα είναι οι παράμετροι θερμοκρασίας του μοντέλου. Είναι εκείνες που προσαρμόζουν τις I-V μετρήσεις του μοντέλου στην επιρροή της παραμέτρου θερμοκρασία.

Με μώβ(—) χρώμα είναι οι παράμετροι που κάνουν scaling το μοντέλο στις διάφορες γεωμετρίες και ιδίως στις narrow-short και narrow-long διαστάσεις.

Τέλος παρατίθεται ένας πίνακας για τις παραμέτρους που αναφέρονται στα *ρεύματα*, στις *χωρητικότητες* και στις *θερμοκρασίες των διόδων* που υπάρχουν στο extrinsic part του Μόσφετ.

	NMOS	PMOS	είδος παραμέτρου
NJS(D)	1.511	1.090	i-v param
XTIS(D)	323.8m	1.614	i-v param
JSS(D)	1.989u	454.8n	i-v param
JSSWS(D)	531.2f	196.1f	i-v param
JSSWGS(D)	531.2f	196.1f	i-v param
JTSS(D)	100.0a	4.480e-20	i-v param
JTSSWS(D)	1.427e-019	5.200f	i-v param
JTSSWGS(D)	1.427e-019	5.200f	i-v param
XTSS(D)	3.977	1.000	i-v param
XTSSWS(D)	2.092	1.000	i-v param
XTSSWGS(D)	2.092	1.000	i-v param
NJTSS(D)	1.997	1.640	i-v param
NJTSSWS(D)	885.7m	1.925	i-v param
NJTSSWGS(D)	885.7m	1.925	i-v param
TNJTSS(D)	200.6	0.000	Temp i-v param
TNJTSSWS(D)	7.236	0.000	Temp i-v param
TNJTSSWGS(D)	7.236	0.000	Temp i-v param
XJBVS(D)	5.000	10.00	i-v param
BVS(D)	10.00	10.00	i-v param
VTSS(D)	616.8m	646.7m	i-v param
VTSSWS(D)	548.6m	552.3m	i-v param
VTSSWGS(D)	548.6m	552.3m	i-v param
GMIN	14.54f	0.000	i-v param

CJS(D)	794.6u	794.6u	c-v param
PBS(D)	455.3m	455.3m	c-v param
CJSWS(D)	475.3p	475.3p	c-v param
CJSWGS(D)	475.3p	475.3p	c-v param
MJSWS(D)	387.4m	387.4m	c-v param
MJSWGS(D)	387.4m	387.4m	c-v param
PBSWS(D)	934.5m	934.5m	c-v param
PBSWGS(D)	934.5m	934.5m	c-v param
TCJ	997.5u	997.5u	Temp c-v param
TCJSW	812.7u	812.7u	Temp c-v param
TCJSWG	812.7u	812.7u	Temp c-v param
TPB	1.845m	1.845m	Temp c-v param
TPBSW	2.267m	2.267m	Temp c-v param
TPBSWG	2.267m	2.267m	Temp c-v param

Πίνακας II: Παράμετροι διόδων για ρεύμα, θερμοκρασία και χωρητικότητες

Με μπλέ(—) χρώμα είναι οι παράμετροι I-V των διόδων του μοντέλου.

Με πράσινο(—) χρώμα είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν τα C-V δεδομένα των διόδων.

Με κόκκινο(—) χρώμα είναι οι παράμετροι θερμοκρασίας για τα I-V δεδομένα των διόδων.

Με σκούρο κόκκινο(—) χρώμα είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμοκρασία οσον αφορά τις χωρητικότητες στις διόδους.

Μια σύντομη περιγραφή καθεμιάς παραμέτρου και το φαινόμενο το οποίο αυτή αντιμετωπίζει, δίνονται στο **Παράρτημα I**.

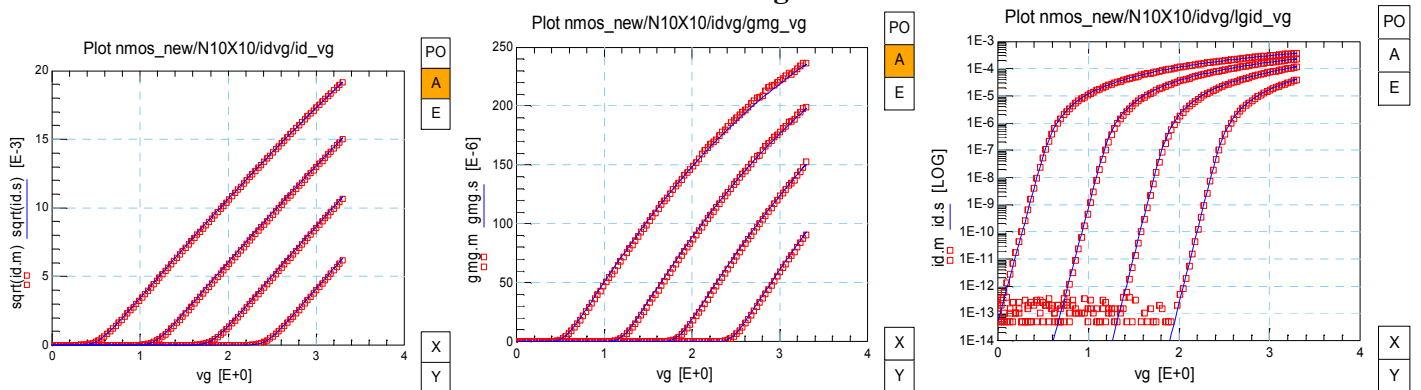
Παράρτημα III

Στο Παράρτημα III, δίνονται όλες οι γραφικές παραστάσεις του **Wide/Long** (10um/10um) και **Wide/Short** (10um/0.5um) NMOS και PMOS τρανζίστορ στην τεχνολογία 0.5um.

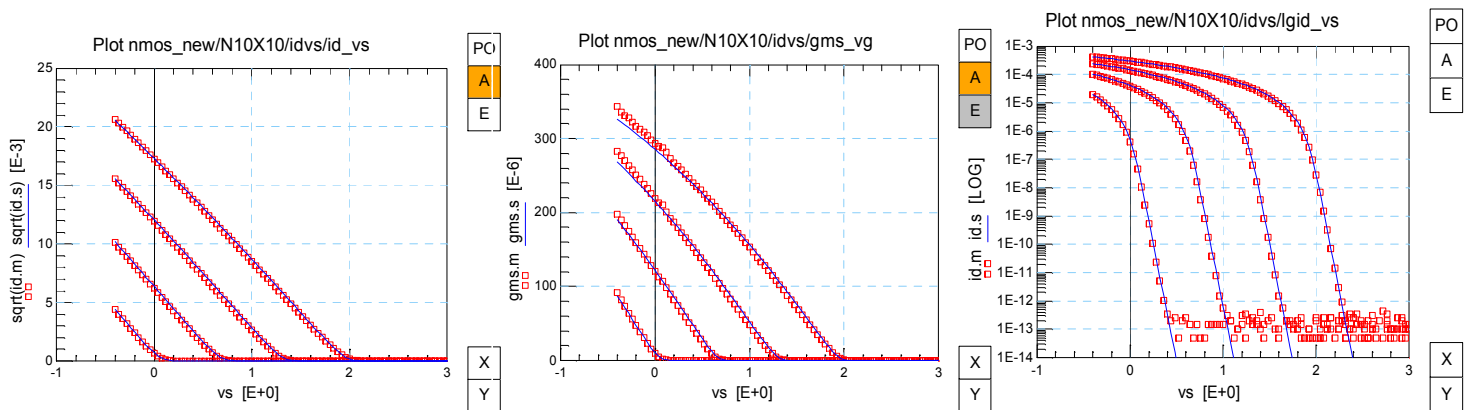
A. Γραφικές I-V για wide-long τρανζίστορ (10x10um)

I. NMOS

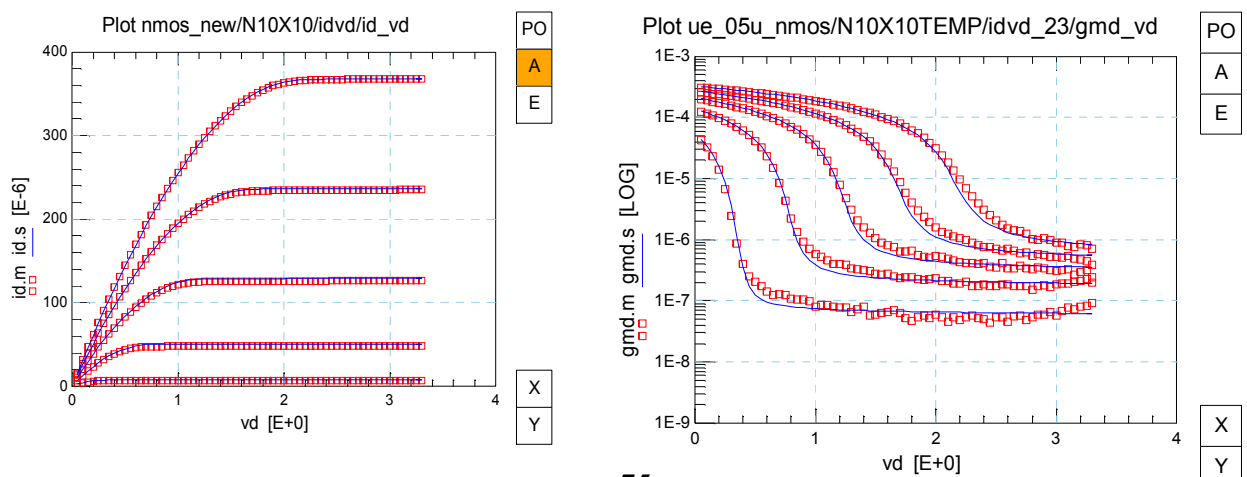
➤ Id-Vg



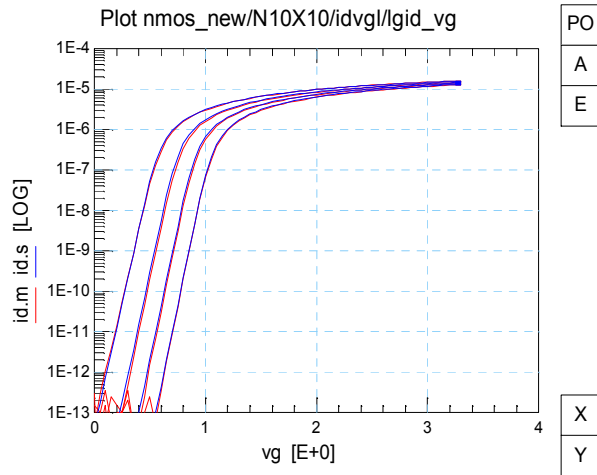
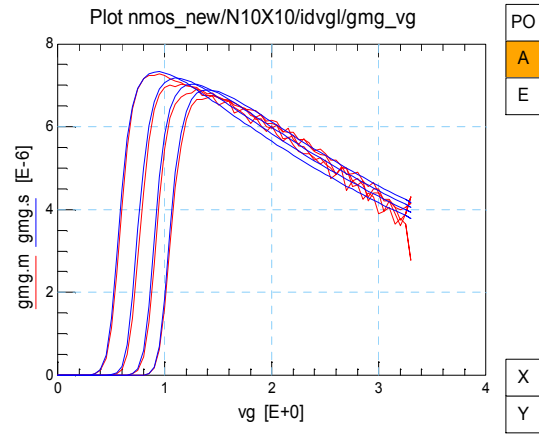
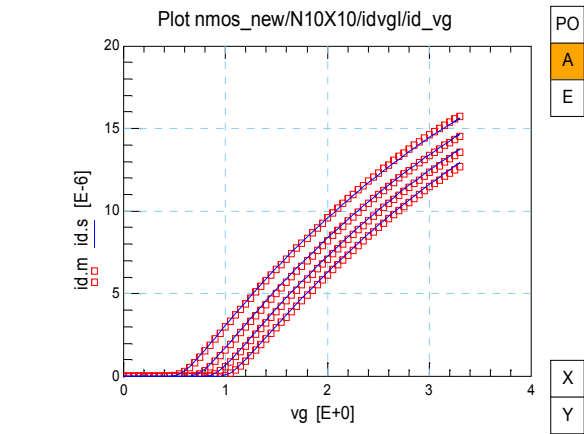
➤ Id-Vs



➤ Id-Vd

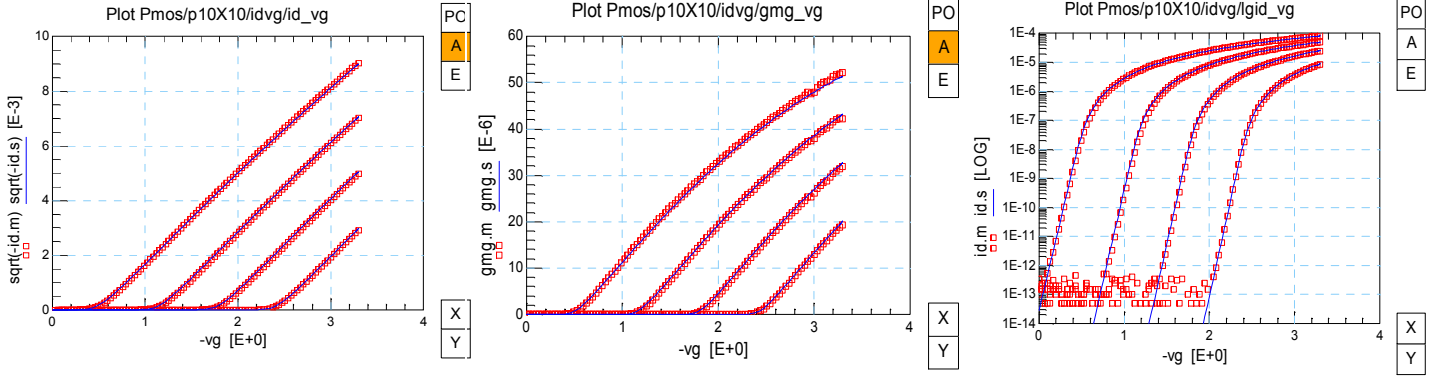


➤ Id-V_{gl}

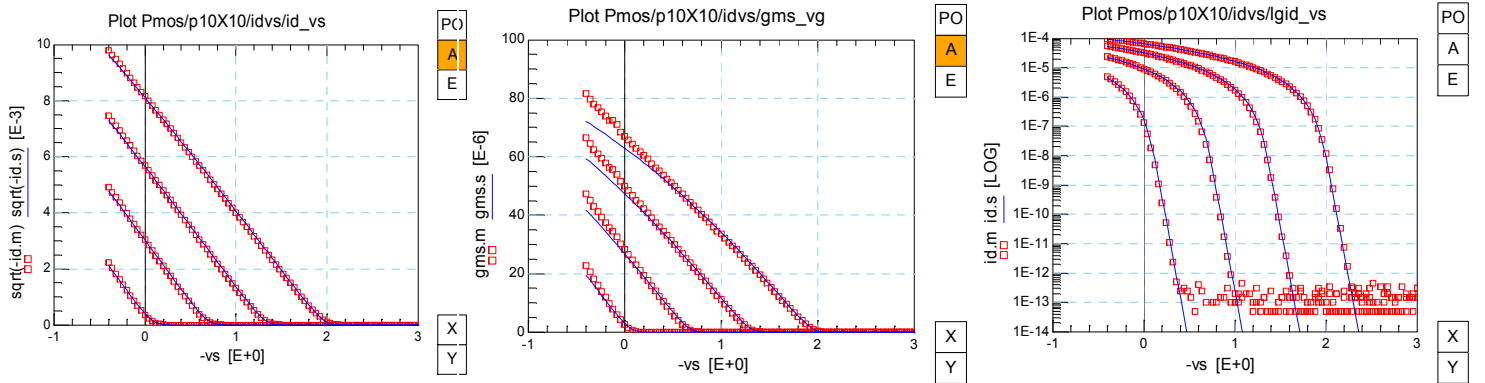


II. PMOS

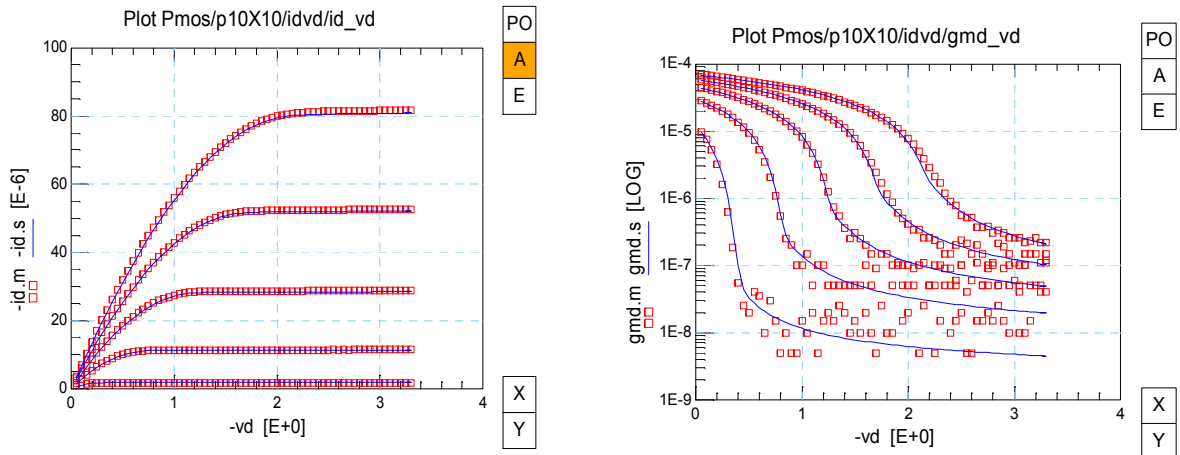
➤ Id-Vg



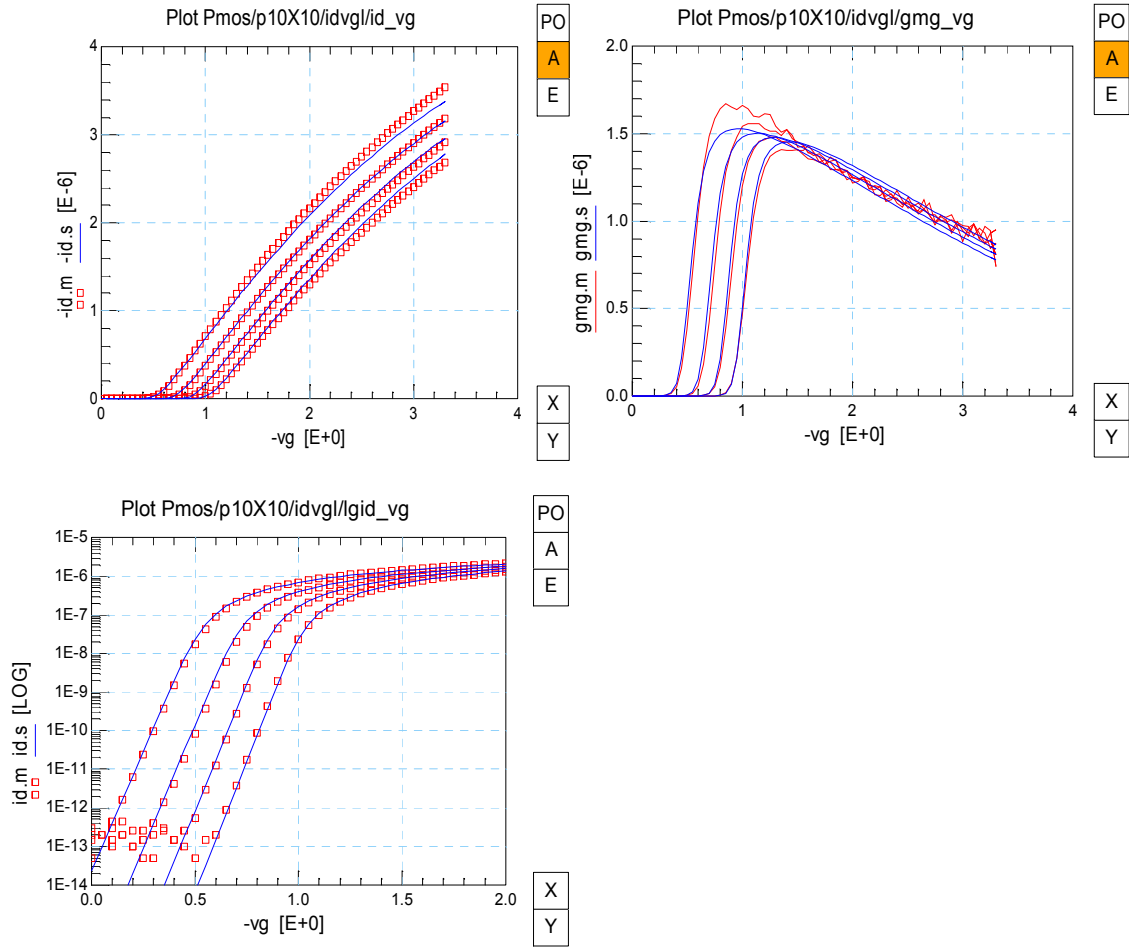
➤ Id-Vs



➤ Id-Vd



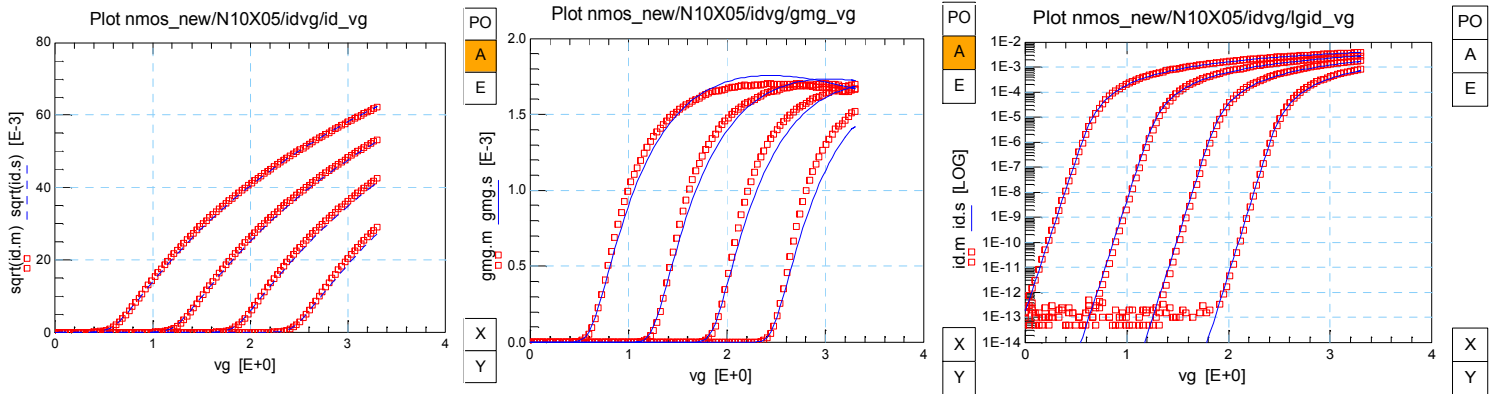
➤ **Id-Vgl**



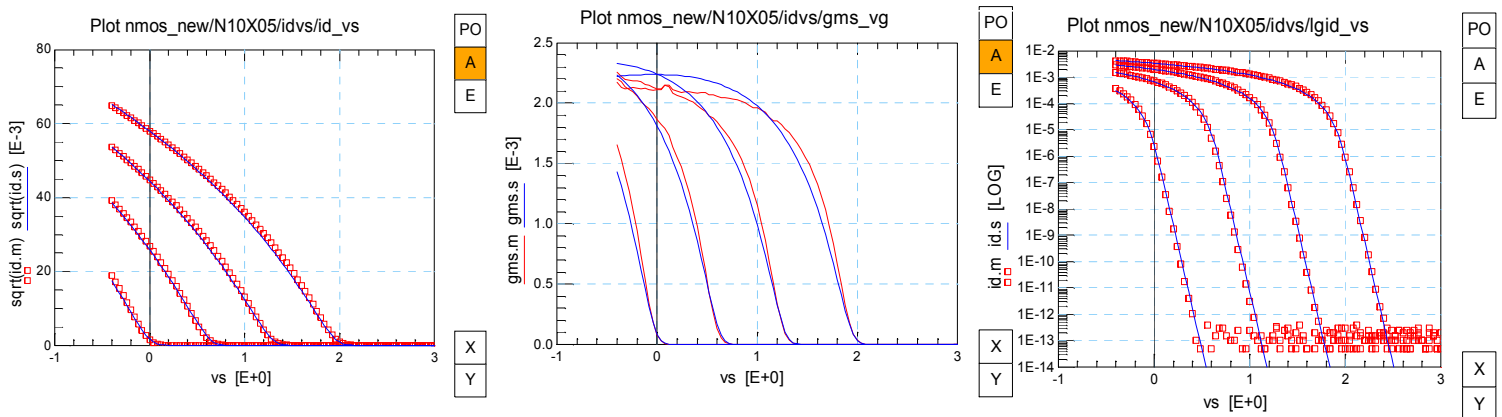
B. Γραφικές I-V για wide-short τρανζίστορ (10x0.5)

I. NMOS

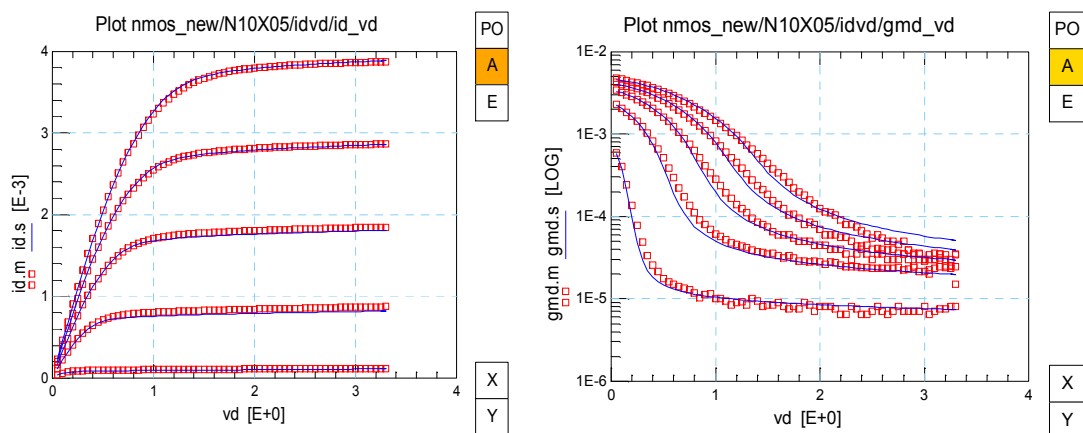
➤ Id-Vg



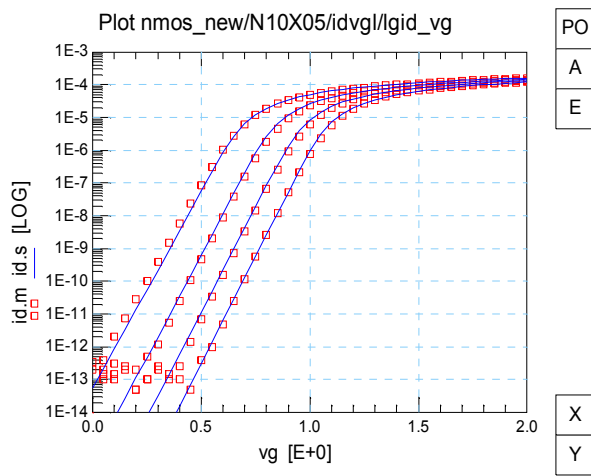
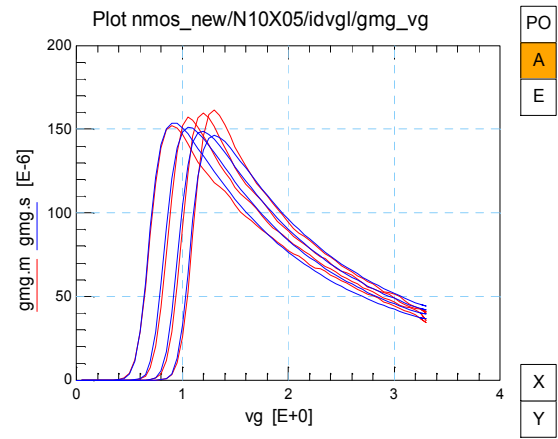
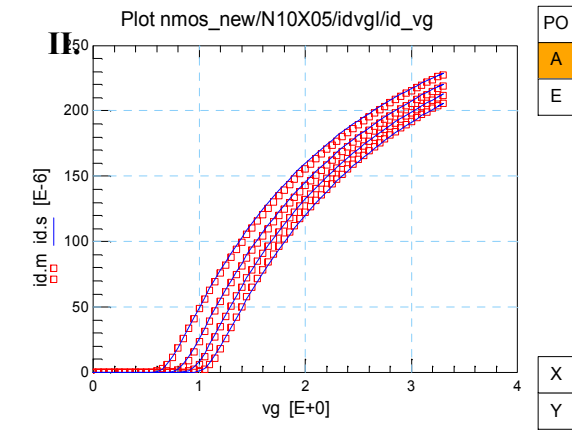
➤ Id-Vs



➤ Id-Vd

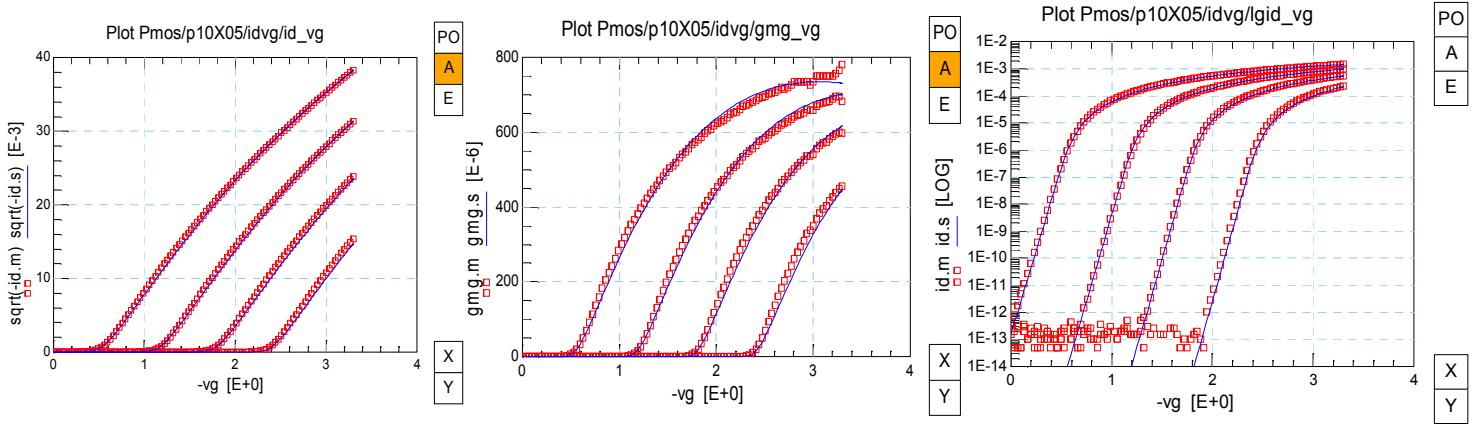


➤ Id-Vgl

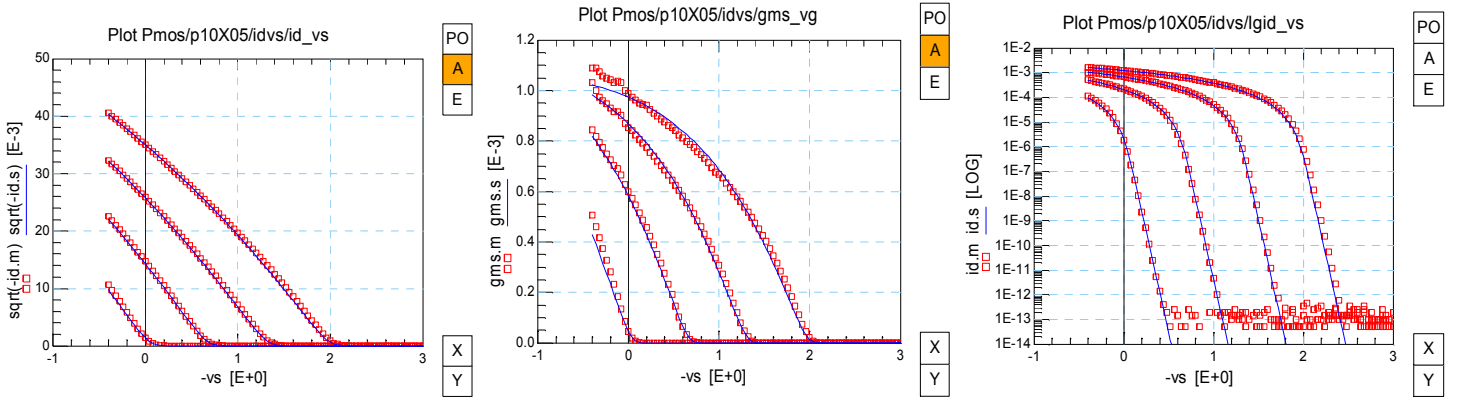


II. PMOS

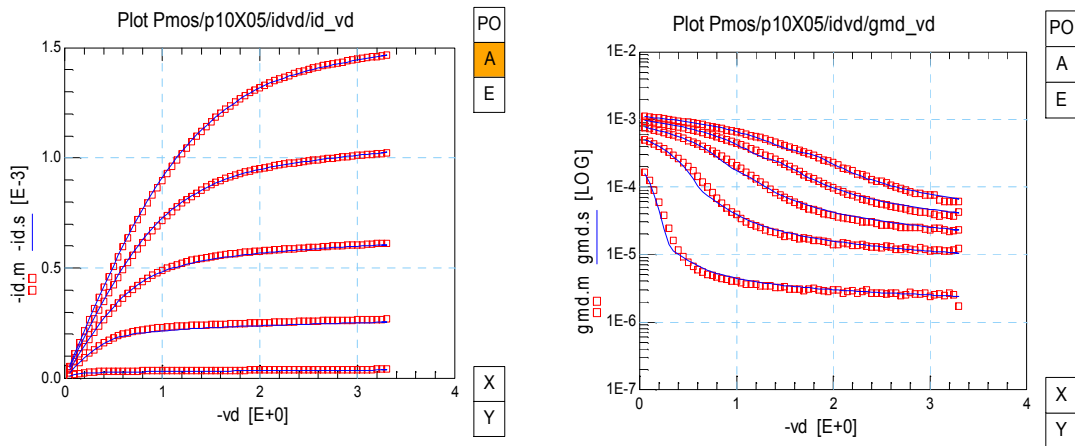
➤ Id-Vg



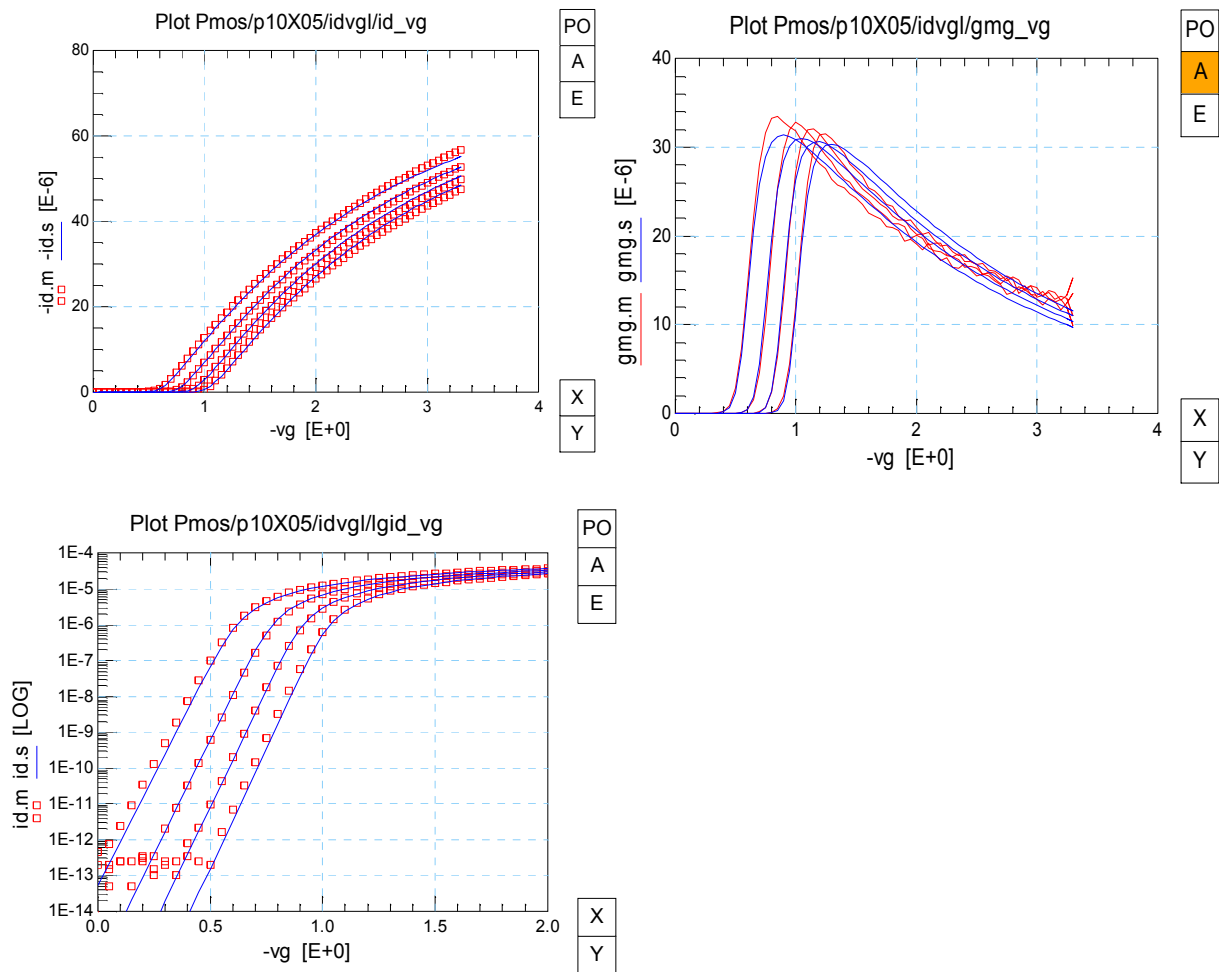
➤ Id-Vs



➤ Id-Vd



➤ Id-Vgl



** Σημειώνεται ότι οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις, είναι για NMOS και για PMOS και εξετάζονται κατά αντιπαράθεση (αριστερή στήλη τα Nmos και δεξιά τα Pmos). Με **κόκκινο χρώμα** παρουσιάζεται κάθε φορά η γραφική παράσταση που προκύπτει από το μετρούμενο κάθε φορά ρεύμα, ενώ με **μπλε χρώμα** παρουσιάζεται στην ίδια γραφική, αυτό που προκύπτει μετά την προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε δηλαδή το θεωρητικό εκείνο που προκύπτει από το μοντέλο. Η προσομοίωση έχει γίνει με την εξαγωγή των τιμών των παραμέτρων του *EKV301.02* μοντέλου χειροκίνητα.

Παράρτημα IV

Στο Παράρτημα IV δίνονται όλες οι γραφικές παραστάσεις των χωρητικοτήτων

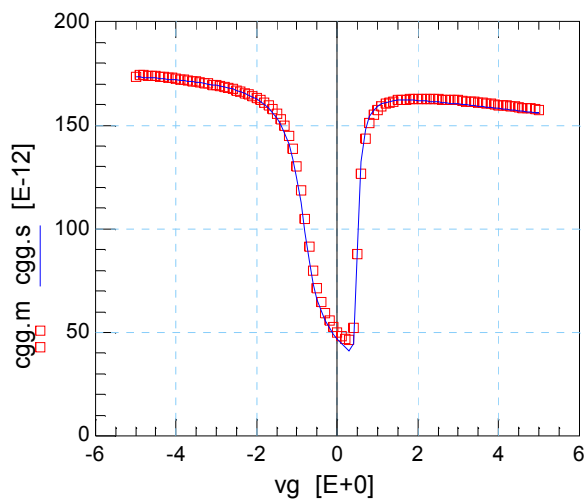
Capacitance Wide/Long (660um/76um , 5V – 10KHz – 10mV compliance) και

Capacitance Wide/Short (96.10mm/500nm, 5V – 100KHz – 10mV compliance) τόσο για NMOS όσο και PMOS στην τεχνολογία 0.5um.

A. Γραφικές C-V για Wide-Long τρανζίστορ (660um/76um)

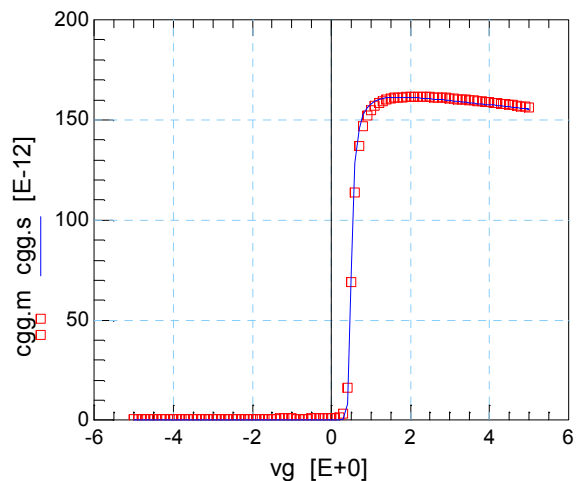
I. NMOS

Plot ue_05u_nmos/NL_nmos_cggs/cggs_5v_10k_10mv/CGG



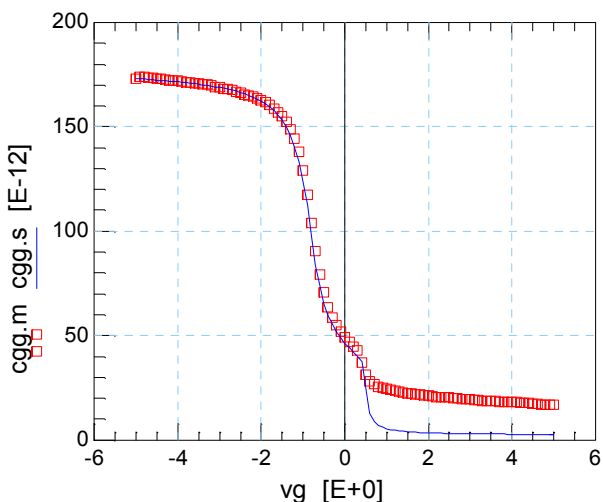
Σχ.4.3.1.1 CGG (Capacitance Gate-Gate)

Plot ue_05u_nmos/NL_nmos_cggs/cgs_5v_10k_10mv/CGS



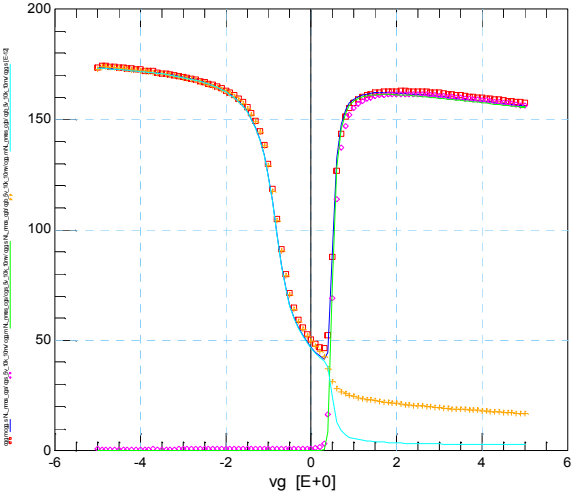
Σχ.4.3.1.2 CGS (Capacitance Gate-Source)

Plot ue_05u_nmos/NL_nmos_cgb/cgb_5v_10k_10mv/CGB



Σχ.4.3.1.3 CGB (Capacitance Gate-Bulk)

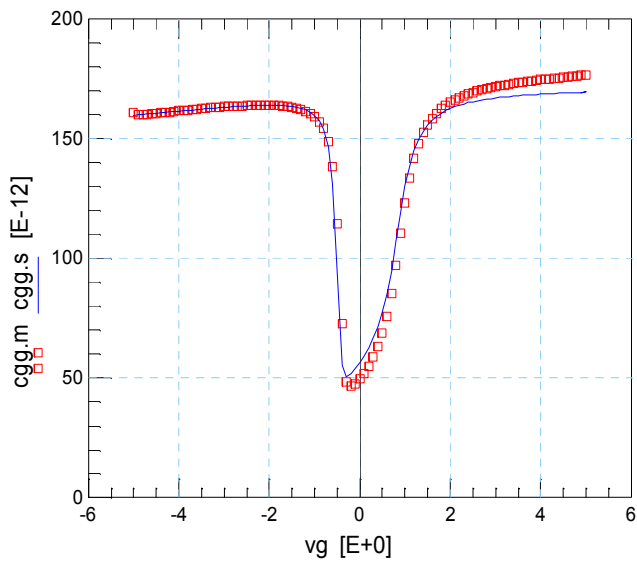
Plot ue_05u_nmos/NL_nmos_cggs/cggs_5v_10k_10mv/CGG_s__1



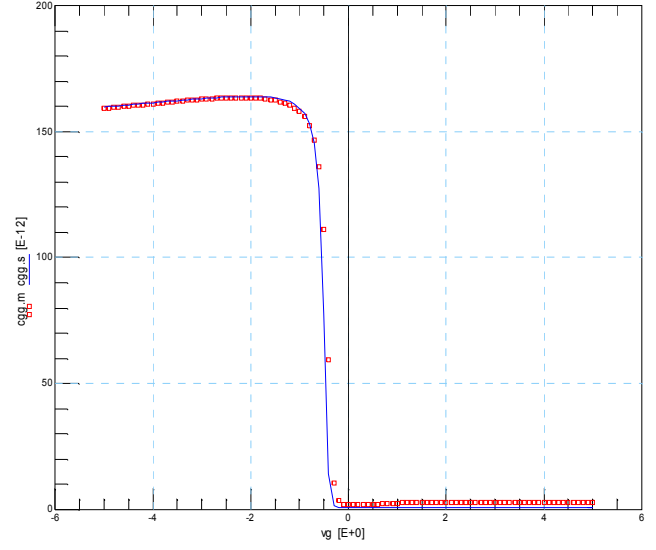
Σχ.4.3.1.4 NMOS All Capacitances

II. PMOS

Plot Pmos/PL_pmos_cgg/cgg_5v_10k_10mv/CGG



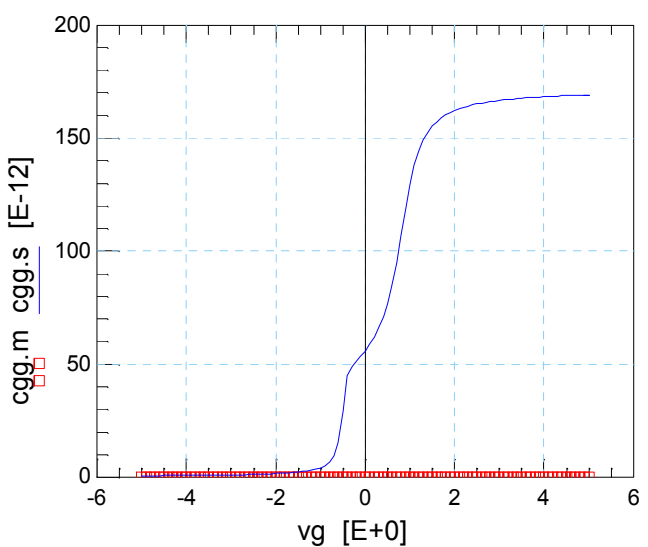
Plot Pmos/PL_pmos_cgs/cgs_5v_10k_10mv/C_Gate_BDS



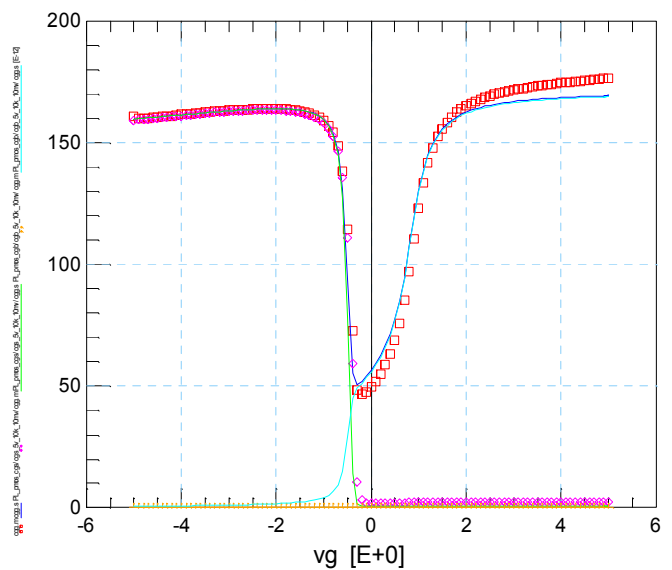
Σχ.4.3.1.5 CGG (Capacitance Gate-Gate)

Σχ.4.3.1.6 CGS (Capacitance Gate-Source)

Plot Pmos/PL_pmos_cgb/cgb_5v_10k_10mv/C_Gate_BDS



Plot Pmos/PL_pmos_cgg/cgg_5v_10k_10mv/CGG_1



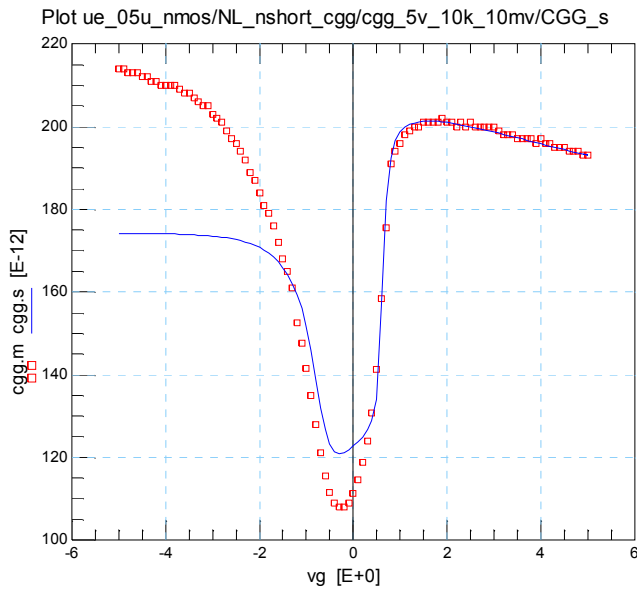
Σχ.4.3.1.7 CGB (Capacitance Gate-Bulk)

Σχ.4.3.1.8 PMOS All Capacitances

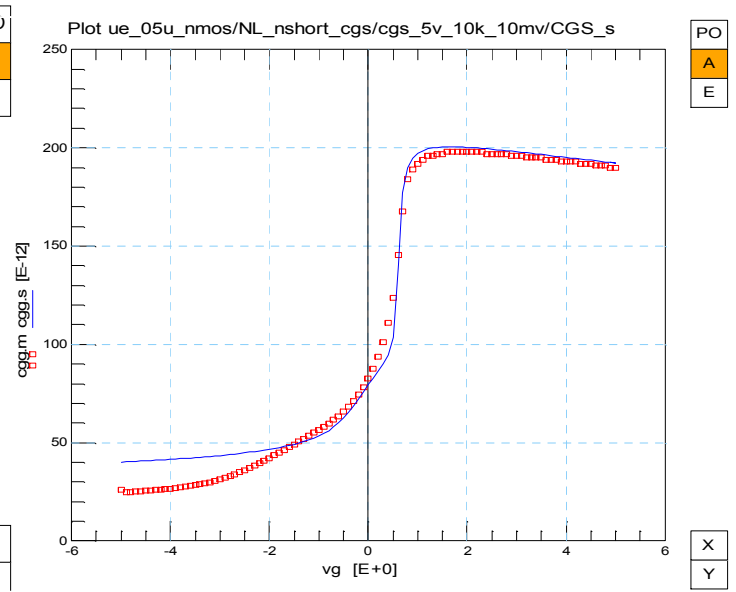
**** Σημειώνεται ότι μετρήσεις χωρητικότητας CGB για PMOS wide-long δεν διατίθενται**

B. Γραφικές C-V για Wide-Short τρανζίστορ (96.10nm/500nm)

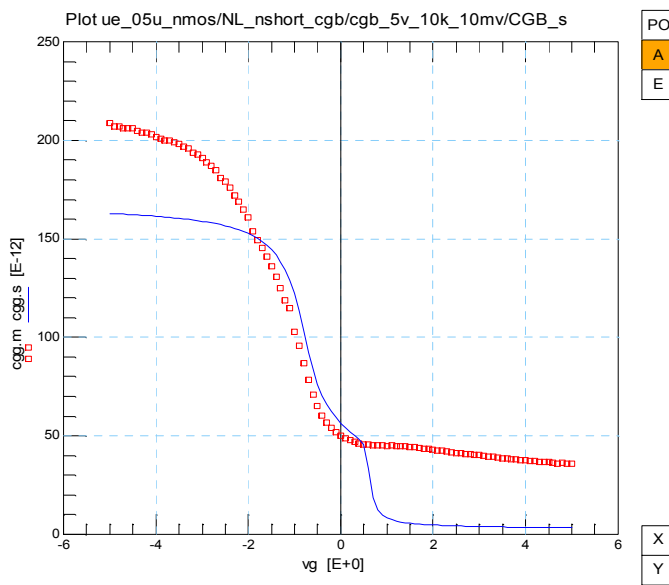
I. NMOS



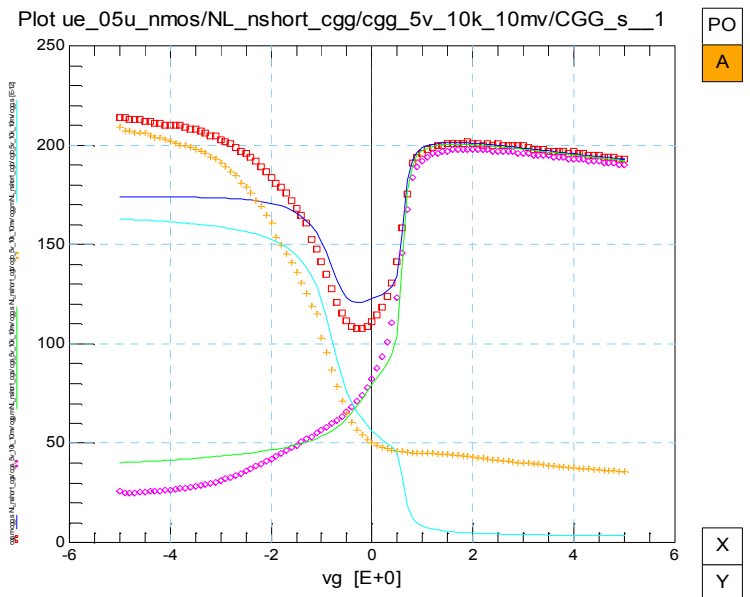
Σχ.4.3.2.1 CGG (Capacitance Gate-Gate)



Σχ.4.3.2.2 CGS (Capacitance Gate-Source)



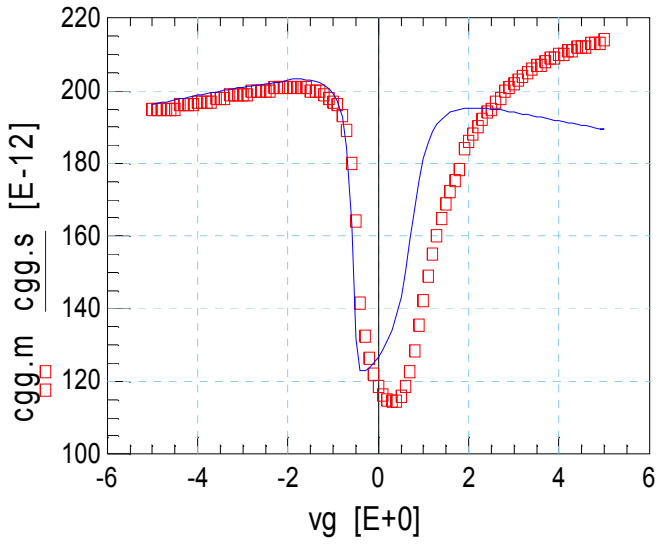
Σχ.4.3.2.3 CGB (Capacitance Gate-Bulk)



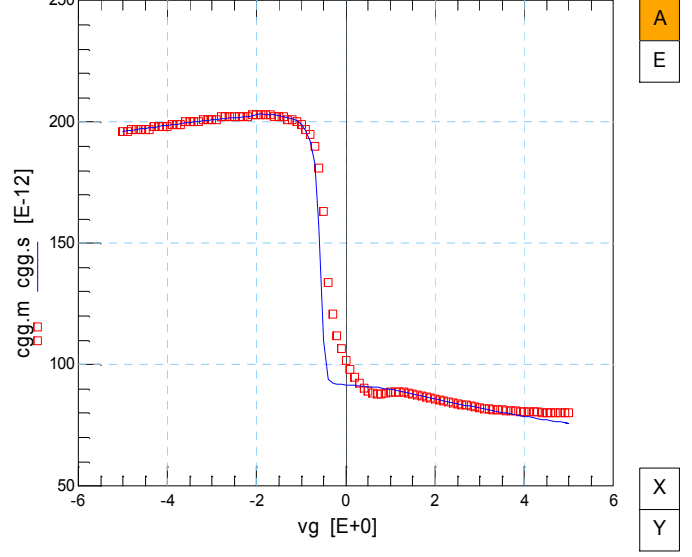
Σχ.4.3.2.4 NMOS All Capacitances

II. PMOS

Plot Pmos/PL_pshort_cgg/cgg_5v_10k_10mv/CGG_s



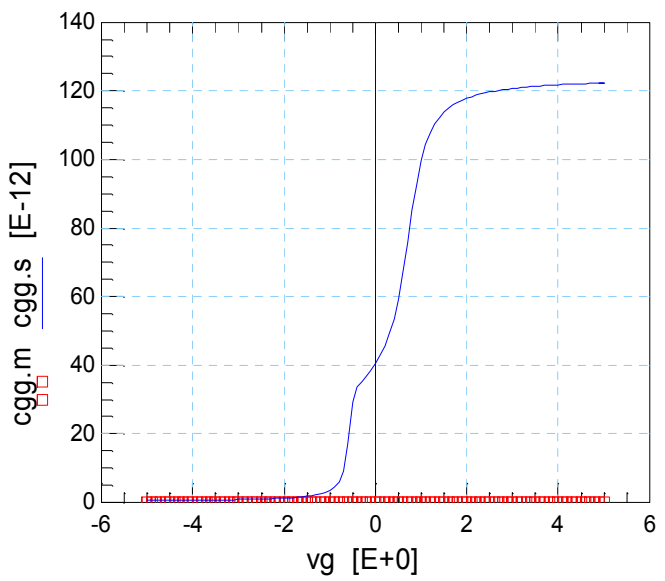
Plot Pmos/PL_pshort_cgs/cgs_5v_10k_10mv/C_Gate_BDS



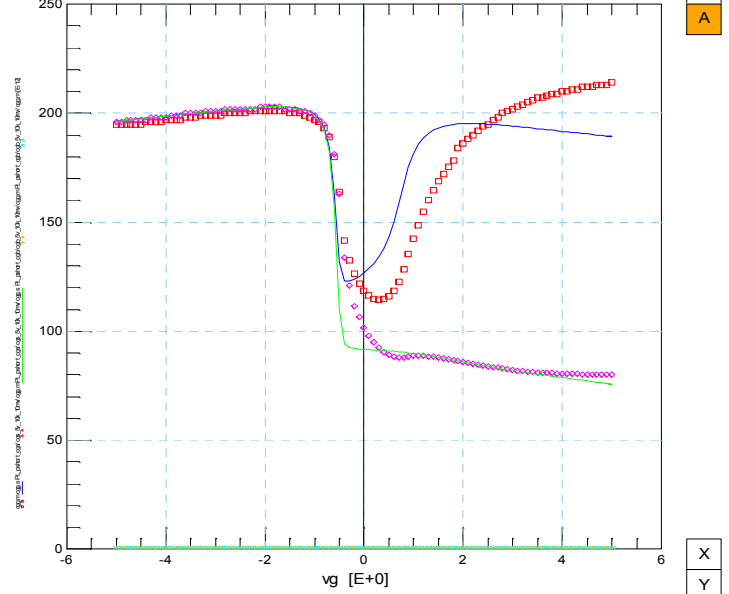
Σχ.4.3.2.5 CGG (Capacitance Gate-Gate)

Σχ.4.3.2.6 CGS (Capacitance Gate-Source)

Plot Pmos/PL_pshort_cgb/cgb_5v_10k_10mv/C_Gate_BDS



Plot Pmos/PL_pshort_cgg/cgg_5v_10k_10mv/CGG_s_1



Σχ.4.3.2.7 CGB (Capacitance Gate-Bulk)

Σχ.4.3.2.8 PMOS All Capacitances

**** Σημειώνεται ότι μετρήσεις χωρητικότητας CGB για PMOS wide-short δεν διατίθενται**

Παράρτημα V

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη θερμοκρασία, έδειξαν την εγκυρότητα του EKV3 μοντέλου, καθιστώντας το αξιόπιστο σε όλες τις περιοχές λειτουργίας ενός τρανζίστορ, για όλες τις γεωμετρίες και στις 3 θερμοκρασίες των δεδομένων που διαθέταμε.

A. Γραφικές Θερμοκρασίας για wide-long τρανζίστορ (10x10um)

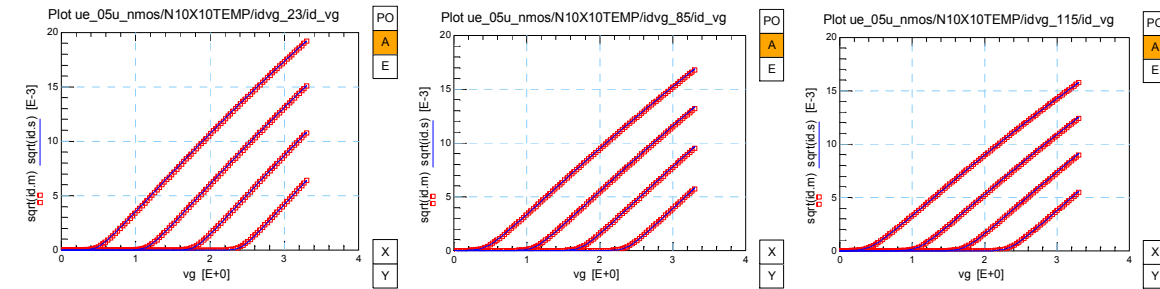
I. NMOS

ο Id-vg

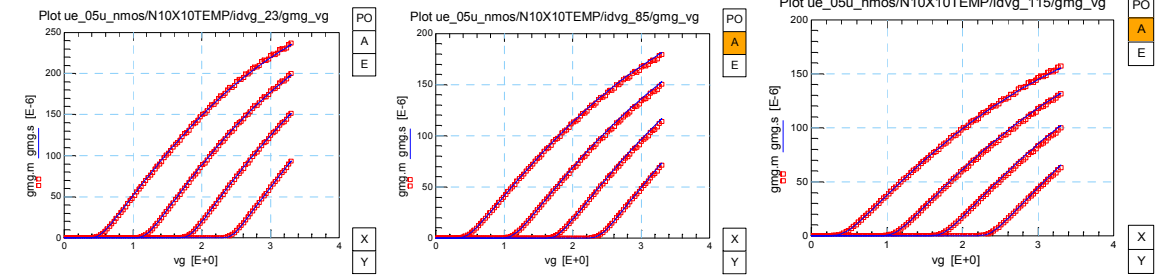
$$T_1 = 23^{\circ}C$$

$$T_2 = 85^{\circ}C$$

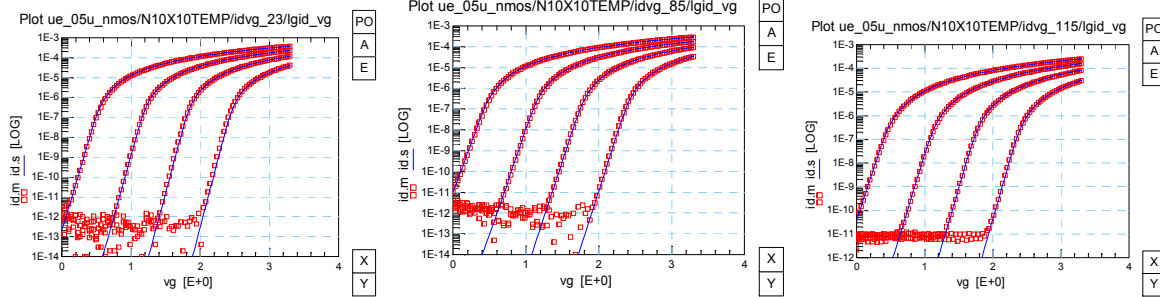
$$T_3 = 115^{\circ}C$$



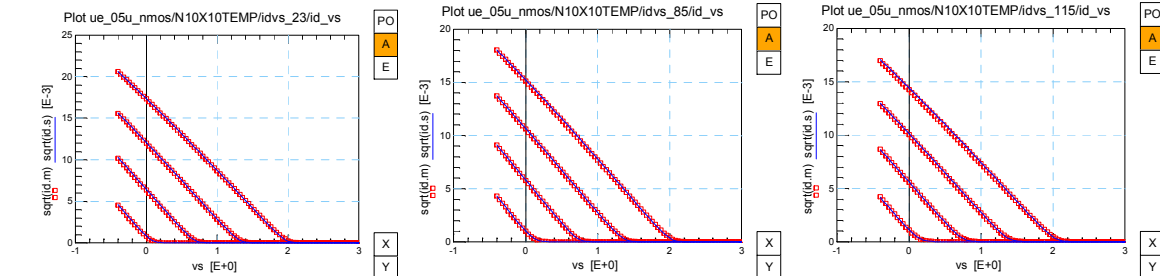
ο Gmg-vg



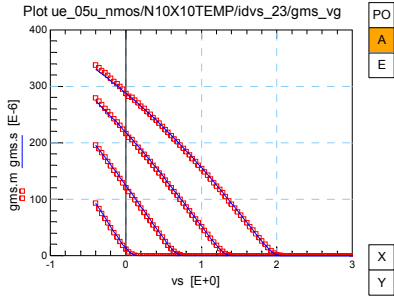
ο Lgid-vg



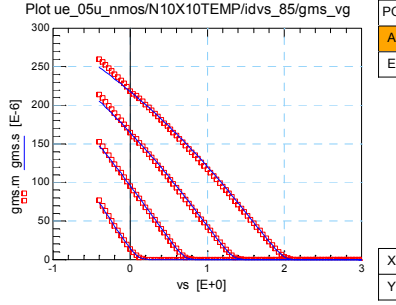
ο Id-Vs



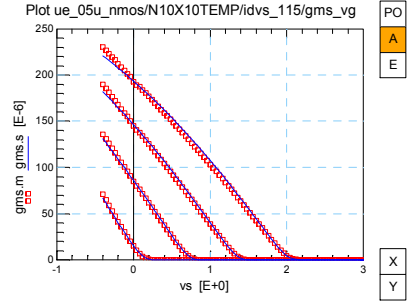
0 Gms-vs
 $T_1 = 23^\circ C$



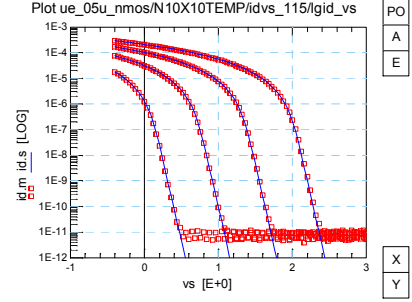
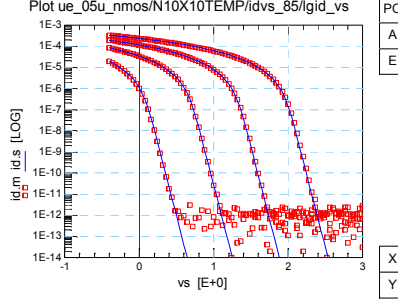
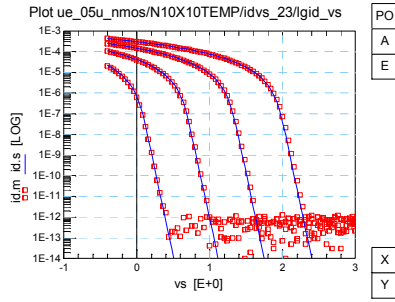
$T_2 = 85^\circ C$



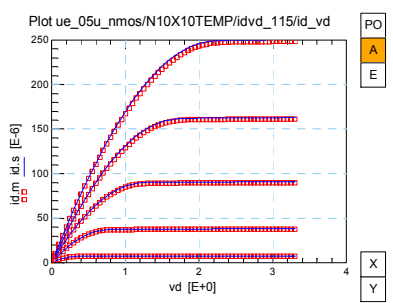
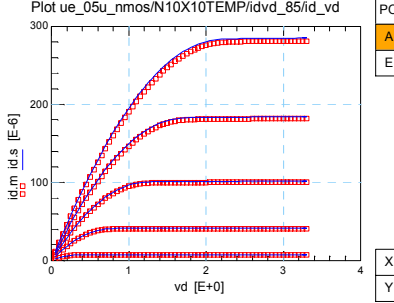
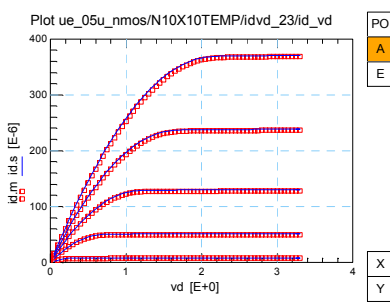
$T_3 = 115^\circ C$



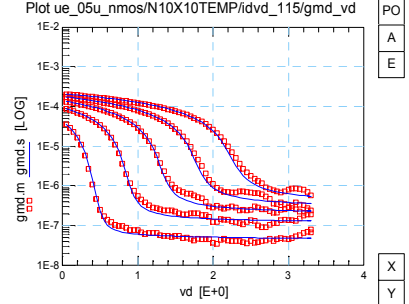
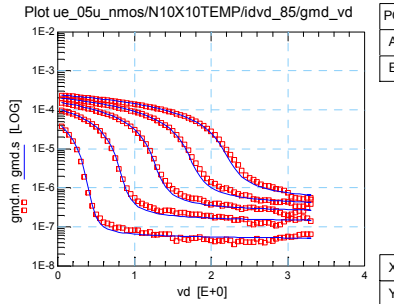
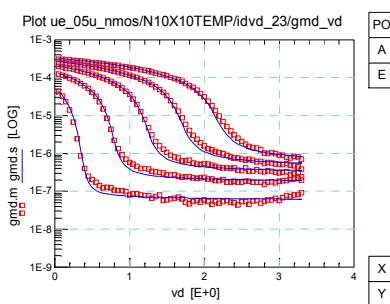
0 Lgid-vs



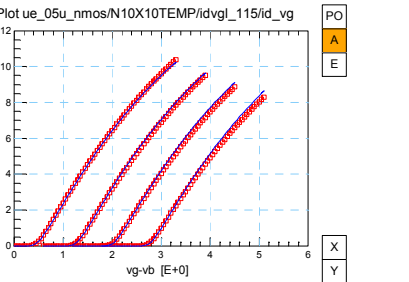
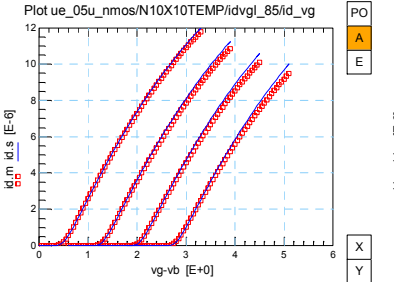
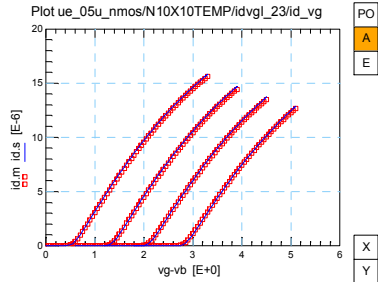
0 Id-vd



0 Gmd-vd

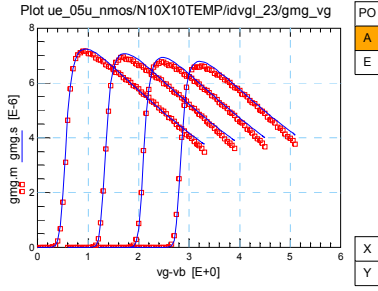


0 Id-vgl

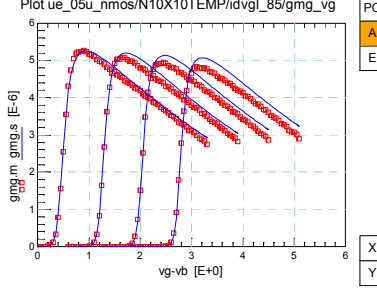


0 Gmg-vg

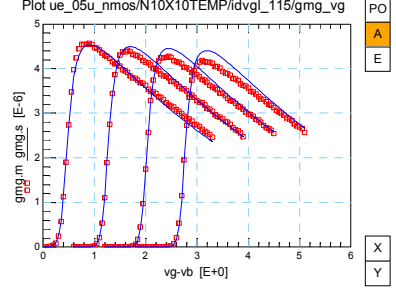
$T_1 = 23^\circ C$



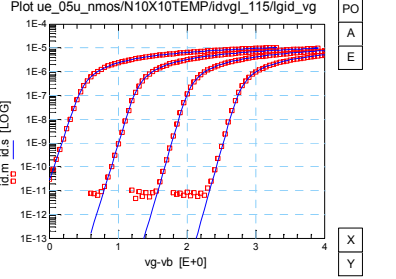
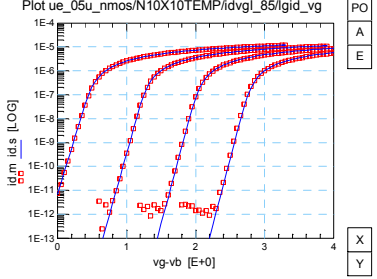
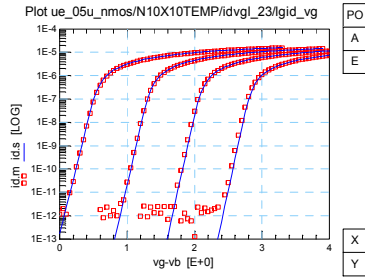
$T_2 = 85^\circ C$



$T_3 = 115^\circ C$

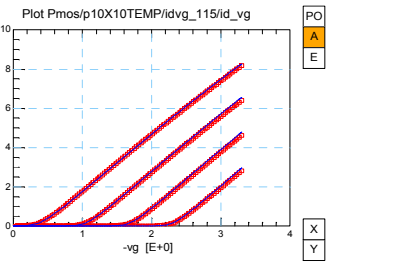
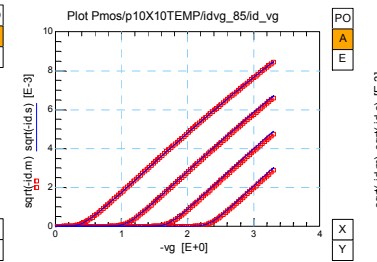
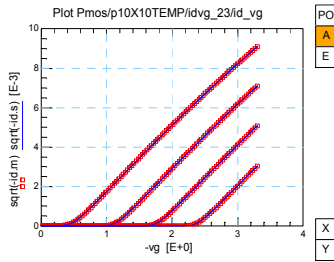


0 Lgid-vg

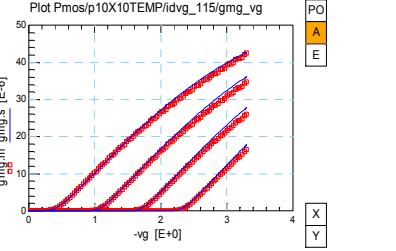
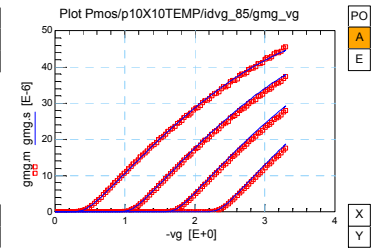
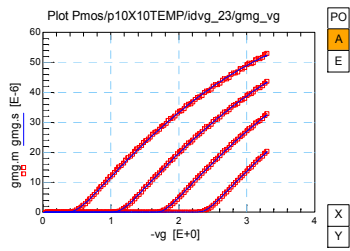


II. PMOS

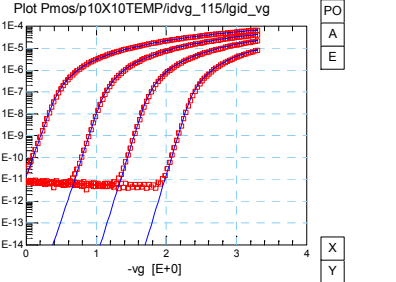
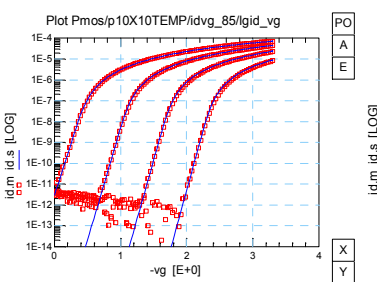
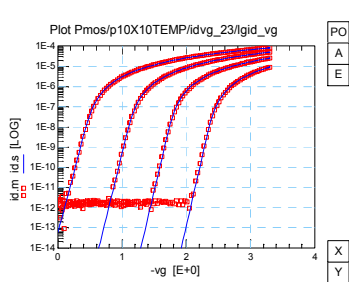
0 Id-vg



0 Gmg-vg

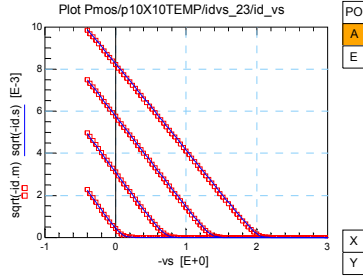


0 Lgid-vg

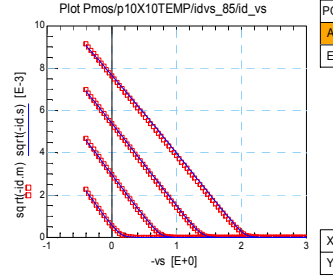


o Id-Vs

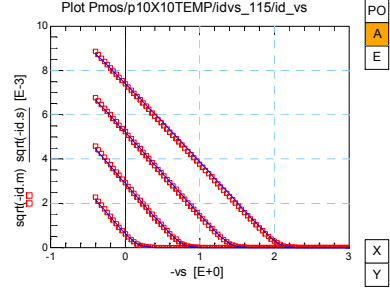
$T_1 = 23^\circ C$



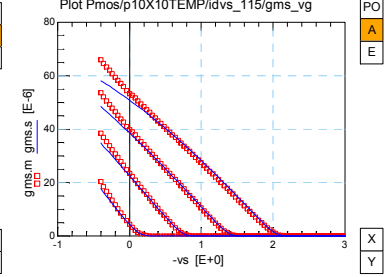
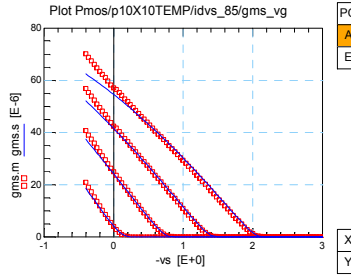
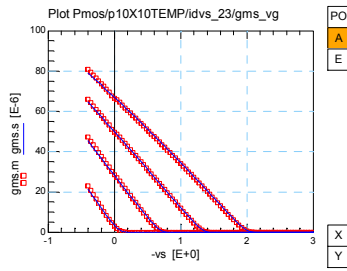
$T_2 = 85^\circ C$



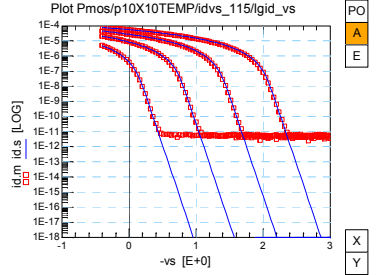
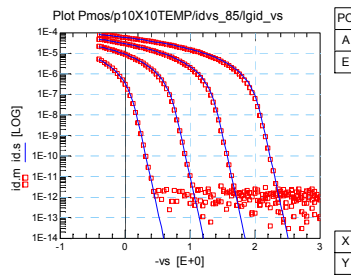
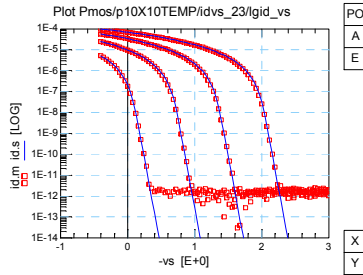
$T_3 = 115^\circ C$



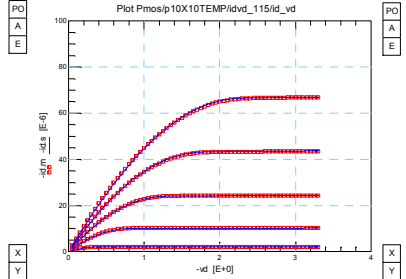
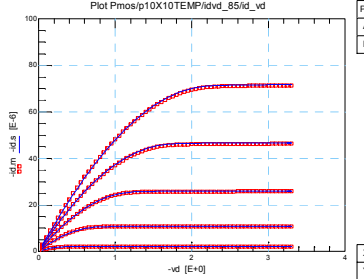
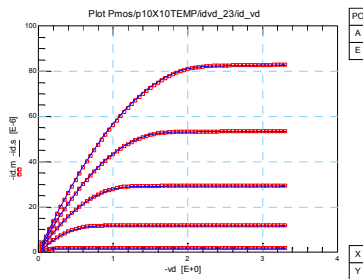
o Gms-vs



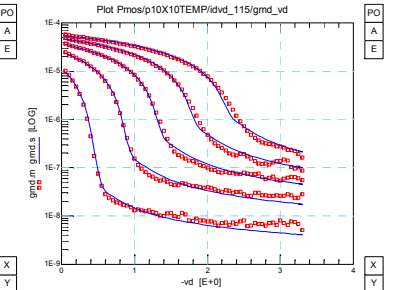
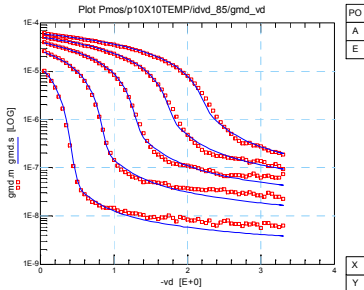
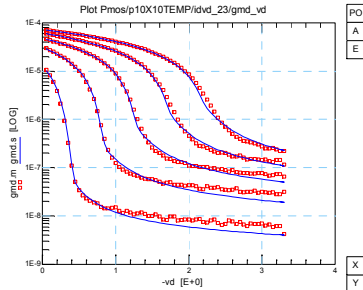
o Lgid-vs



o Id-vd

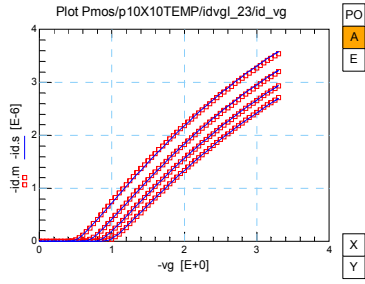


o Gmd-vd

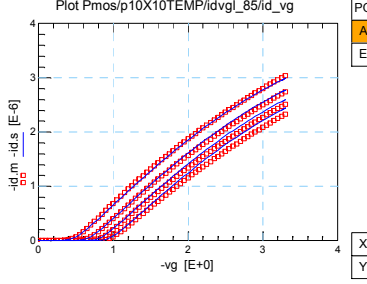


0 Id-vgl

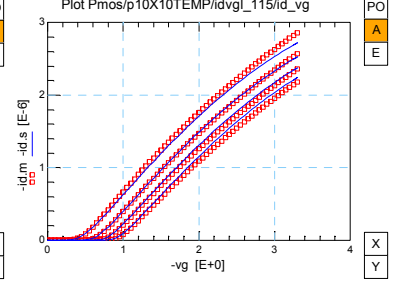
$T_1 = 23^\circ C$



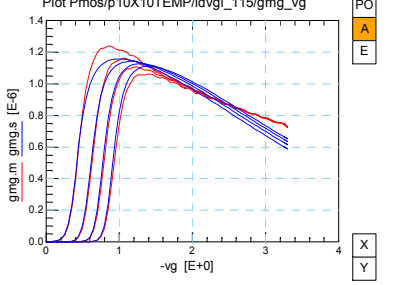
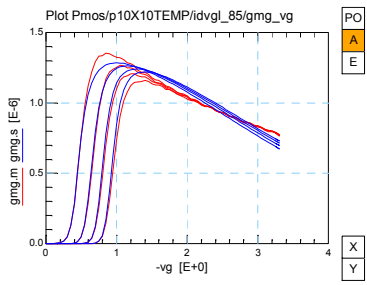
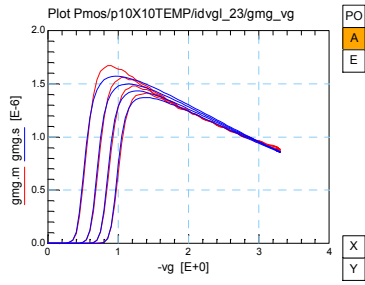
$T_2 = 85^\circ C$



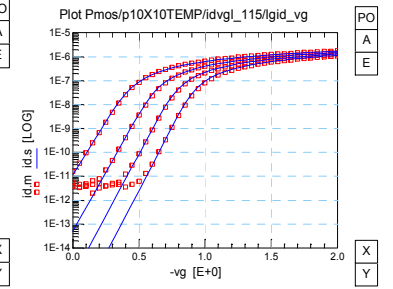
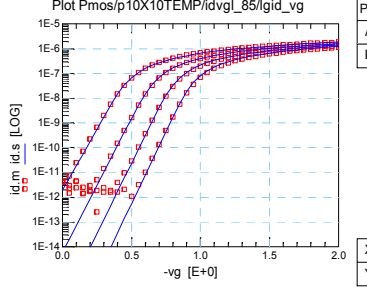
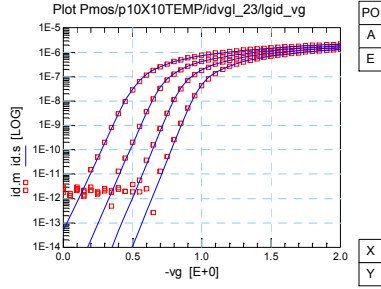
$T_3 = 115^\circ C$



0 Gmg-vg



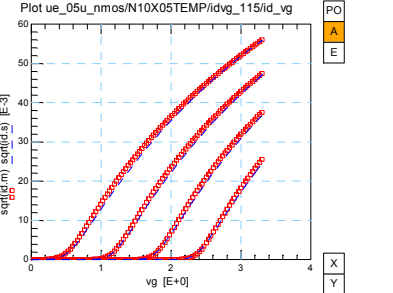
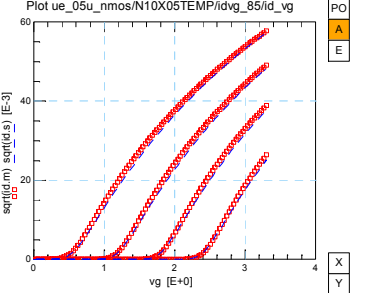
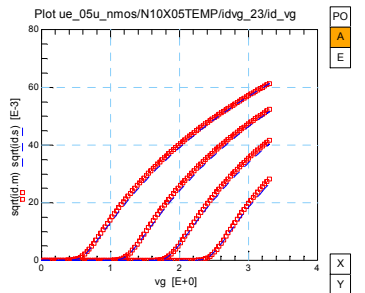
0 Lgid-vg



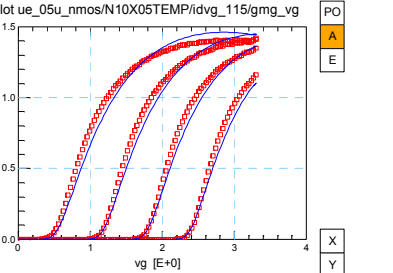
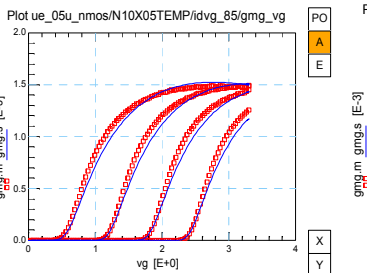
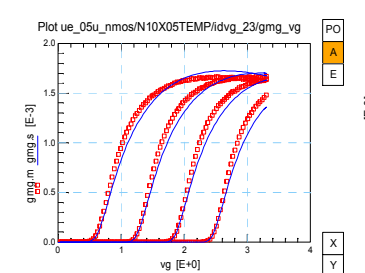
B. Γραφικές Θερμοκρασίας για wide-short τρανζίστορ (10x0.5)

I. NMOS

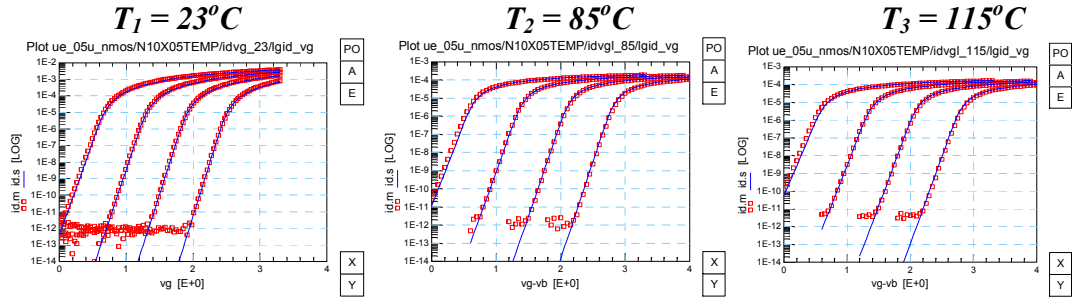
0 Id-vg



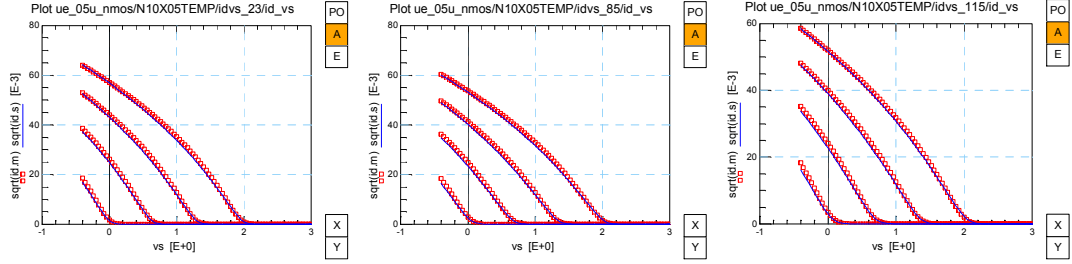
0 Gmg-vg



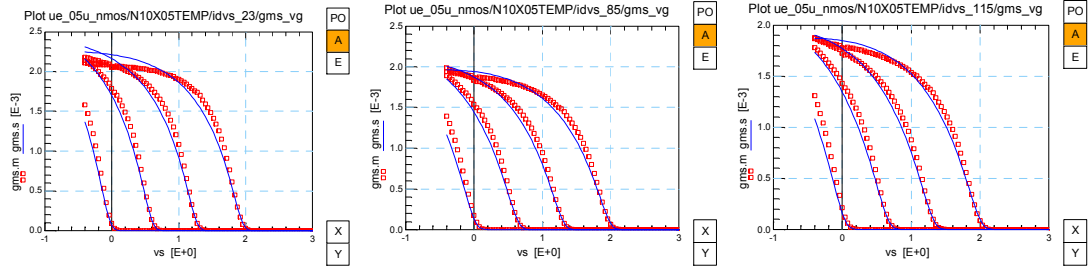
0 Lgid-vg



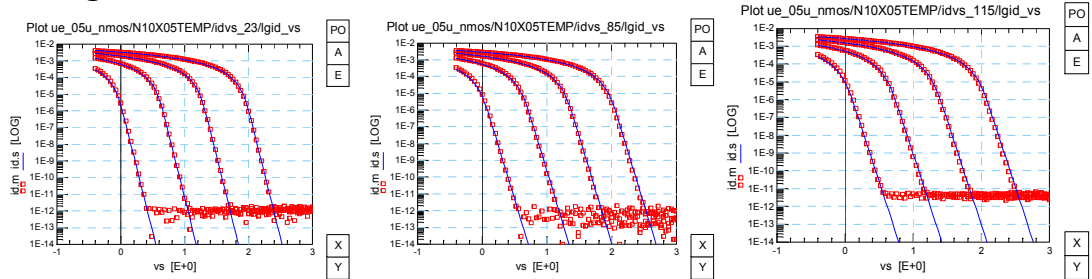
0 Id-Vs



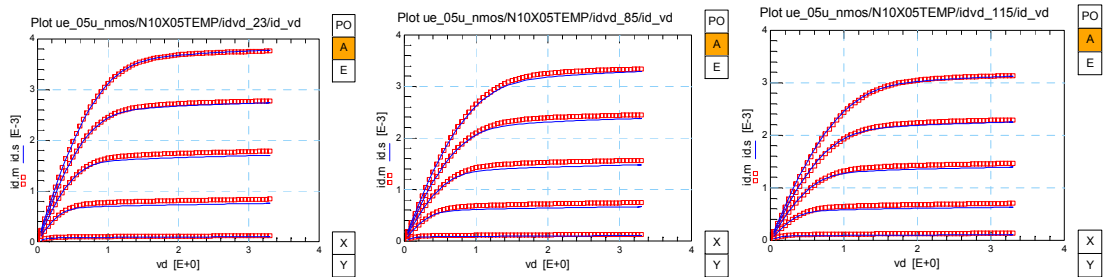
0 Gms-vs



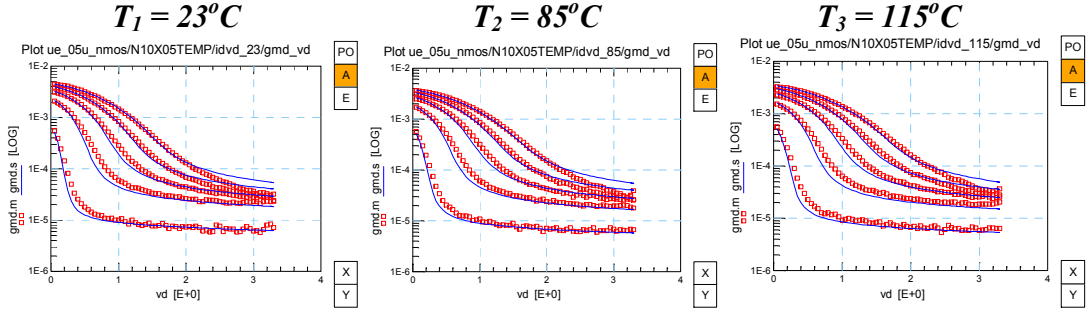
0 Lgid-vs



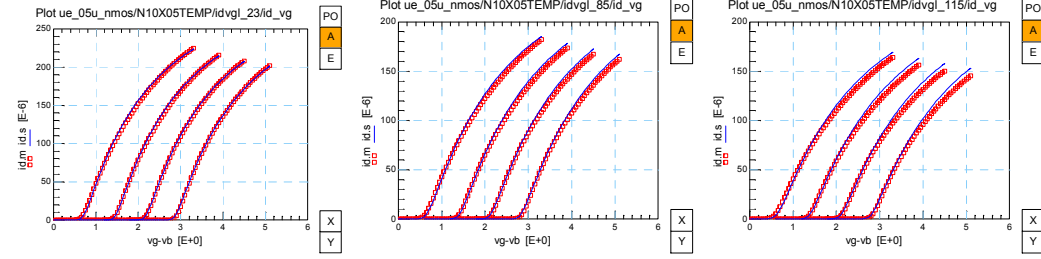
0 Id-vd



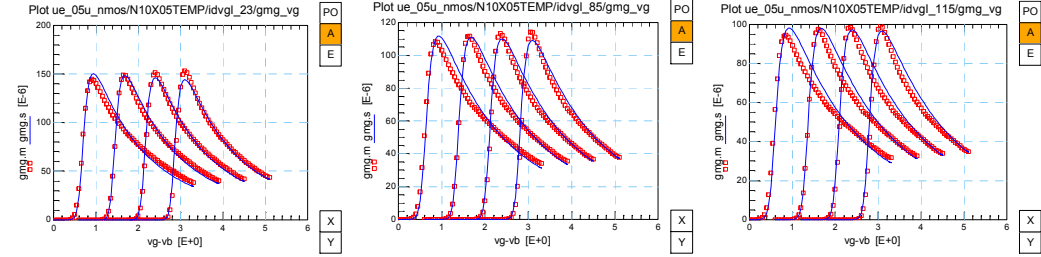
o Gmd-vd



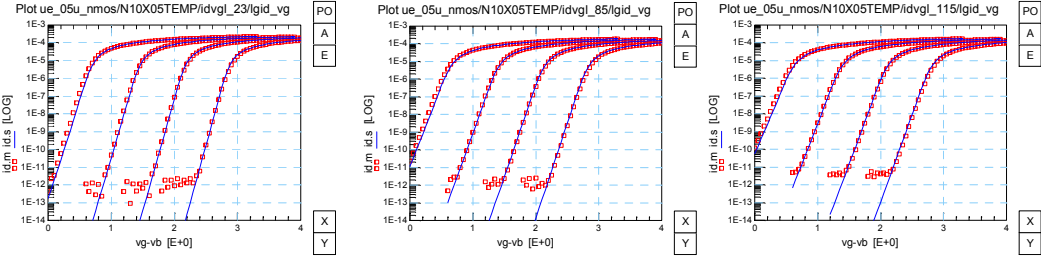
o Id-vgl



o Gmg-vg

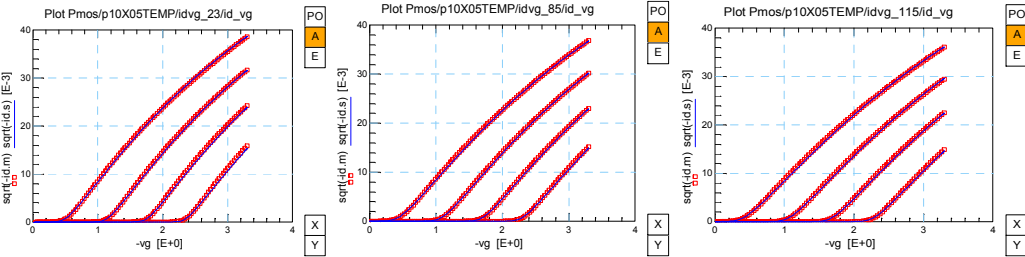


o Lgid-vg

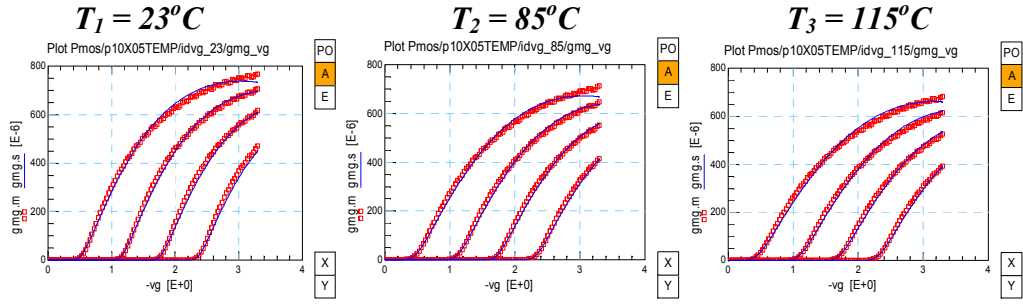


II. PMOS

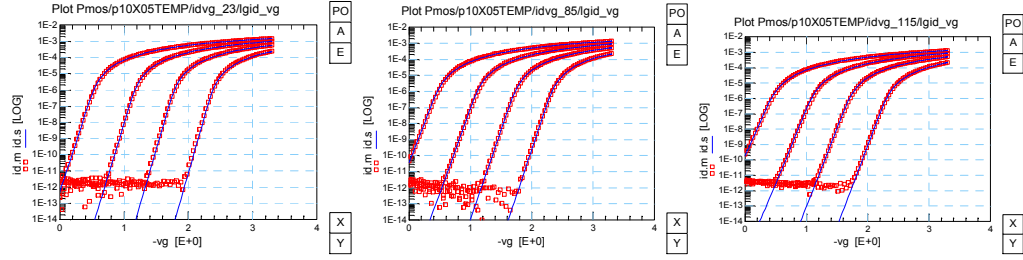
o Id-vg



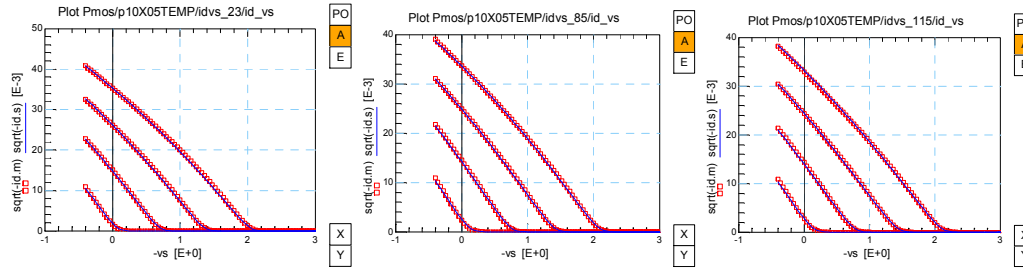
0 Gmg-vg



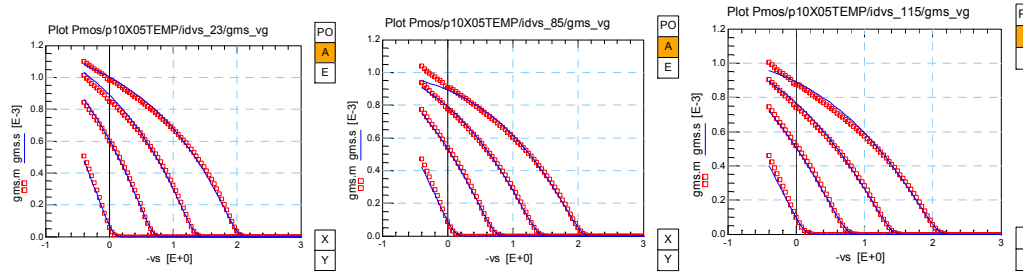
0 Lgid-vg



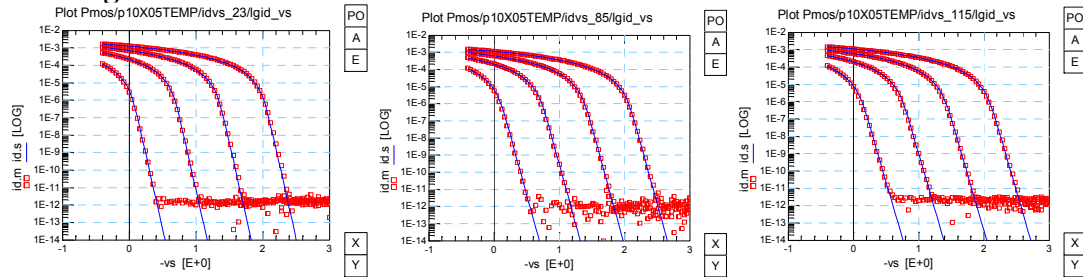
0 Id-Vs



0 Gms-vs

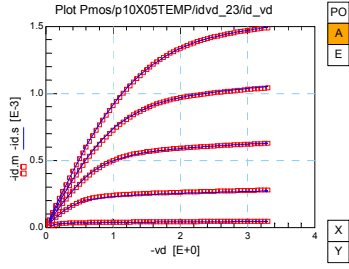


0 Lgid-vs

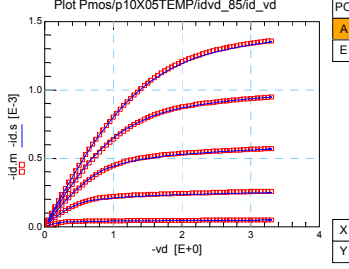


0 Id-vd

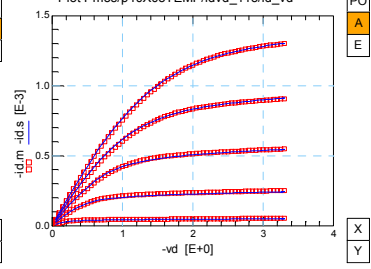
$T_1 = 23^\circ\text{C}$



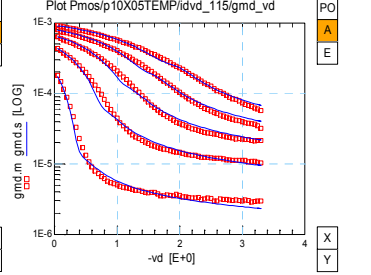
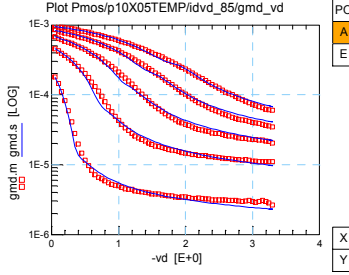
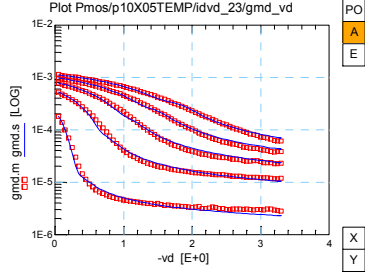
$T_2 = 85^\circ\text{C}$



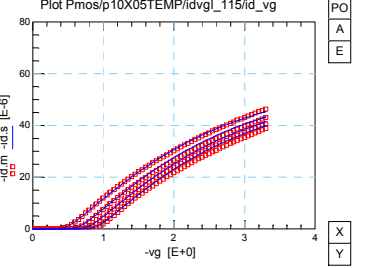
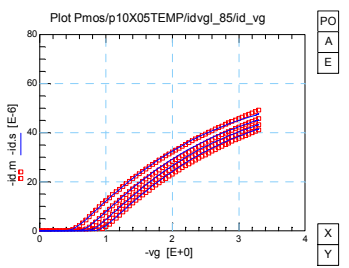
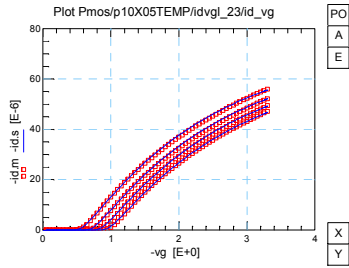
$T_3 = 115^\circ\text{C}$



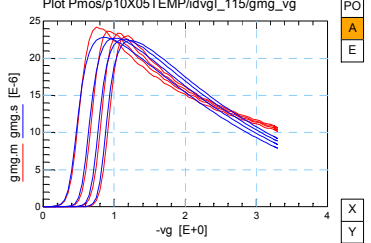
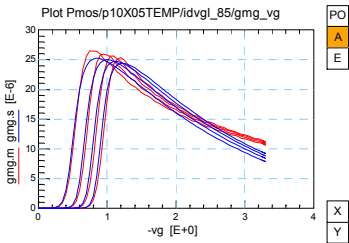
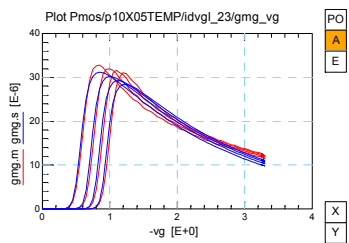
0 Gmd-vd



0 Id-vgl



0 Gmg-vg



0 Lgid-vg

