



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ CMOS ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Δημήτριος Διαμαντάκος

Εξεταστική επιτροπή:
M.Bucher (επιβλέπων)
Κ.Καλαϊτζάκης
Κ.Μπάλας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	4
1.1 Γενικά	4
1.2 Δομή της διπλωματικής	4
2. Συνδεσμολογία εργαστηρίου	6
2.1 Prober Summit 10600	6
2.2 HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer	7
2.3 Λογισμικό	8
2.3.1 Agilent ICCAP 2006B	8
3. EKV3 Μοντέλο	14
3.1 Ορισμός βασικών μεγεθών του EKV3	15
3.2 Ρεύμα καναλιού	17
3.3 Διαγωγιμότητες και φορτία	19
3.4 Φαινόμενα που καλύπτονται από το EKV μοντέλο	20
3.5 Λειτουργία του EKV3 μοντέλου	22
3.6 Συμπερασματικά για το EKV μοντέλο	23
4. Εξαγωγή παραμέτρων	24
4.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων	25
4.2 Εκτέλεση των optimizations	26
5. Συμπεράσματα	37
6. Αναφορές	38
Παράρτημα I	39
Παράρτημα II	49
Παράρτημα III - Extended validation of EKV3 compact model for a 1um CMOS technology	59
Παράρτημα IV - Extended validation of EKV3 compact model for a 0.25um CMOS technology	78
Παράρτημα V - Extended validation of EKV3 compact model for a 0.15um CMOS technology	85

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Στη σύγχρονη εποχή, η CMOS (CMOS := Complementary Metal-Oxide Semiconductor) τεχνολογία είναι η κυρίαρχη τεχνολογία ημιαγωγών για την κατασκευή μικροεπεξεργαστών και μνημών. Χρησιμοποιείται στη σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων προσφέροντας χαμηλό κόστος και υψηλή απόδοση. Στην τεχνολογία αυτή, χρησιμοποιούνται τρανζίστορ τύπου N και τύπου P, ώστε να μπορούν να γίνουν αντιληπτές λογικές συναρτήσεις. Η ανάπτυξη της MOSFET τεχνολογίας έχει φτάσει σε τέτοια όρια, που μπορούμε πλέον να μιλήσουμε για τρανζίστορ με μήκος καναλιού έως και 0.03μm, κάνοντάς την χρήσιμη για κάθε είδους σχεδίαση αναλογικών κυκλωμάτων.

1.2 Δομή της διπλωματικής

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι να μελετηθεί η CMOS τεχνολογία καθώς και να παραχθεί ένα σύστημα αυτόματης εξαγωγής παραμέτρων. Το σύστημα αυτό θα κατασταθεί χρήσιμο, καθώς έχοντας μετρήσεις οποιασδήποτε τεχνολογίας και οποιονδήποτε γεωμετριών, θα γίνει δυνατός ο χαρακτηρισμός των τρανζίστορ καθώς και η επιλογή του κατάλληλου τρανζίστορ για το σκοπό που επιθυμείται.

Στο 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο, έτσι ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι μετρήσεις των διαθέσιμων τρανζίστορ, καθώς και μια σύντομη εισαγωγή του λογισμικού ICCAP που χρησιμοποιήθηκε.

Στο 3^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το EKV3 μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των μετρήσεων. Παρουσιάστηκαν οι αρχές λειτουργίας, καθώς αναφέρθηκαν και στοιχεία που μας δίνουν να καταλάβουμε για ποιο λόγο υπερτερεί έναντι άλλων μοντέλων.

Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το σύστημα εξαγωγής παραμέτρων που ακολουθήθηκε, έτσι ώστε να δημιουργηθεί το αυτοματοποιημένο, όσο γίνεται, σύστημα εξαγωγής παραμέτρων. Αναφέρονται οι βελτιστοποιήσεις που δημιουργήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού ICCAP, καθώς και η σειρά με την οποία πρέπει αυτές να εκτελεστούν μέσω μακροντολών, ώστε να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων του EKV3 μοντέλου.

Στο Παράρτημα I, αναφέρεται κατηγοριοποιημένα ανάλογα με το φαινόμενο το οποίο αντιμετωπίζουν, η λίστα παραμέτρων που υπάρχει στο μοντέλο EKV.

Στο Παράρτημα II, παρουσιάζουμε κάποια στοιχεία για να αναπτυχθεί καλή εμπειρία με τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν. Η εμπειρία αυτή αποκτάται με το να παρατεθούν προσομοιώσεις και το πώς αυτές εξαρτώνται από τις αλλαγές στις τιμές των βασικών παραμέτρων.

Στο Παράρτημα III, υπάρχει αναλυτική αναφορά των setup που έχουν γίνει για την μέτρηση του NMOS και του PMOS της CMOS τεχνολογιών 1 μ m. Υπάρχουν επίσης, γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων και των προσομοιώσεων που έγιναν βάσει του EKV3 μοντέλου, έτσι ώστε να ταυτοποιηθεί η αξιοπιστία του, καθώς υπάρχει και λίστα παραμέτρων για την τεχνολογία αυτή.

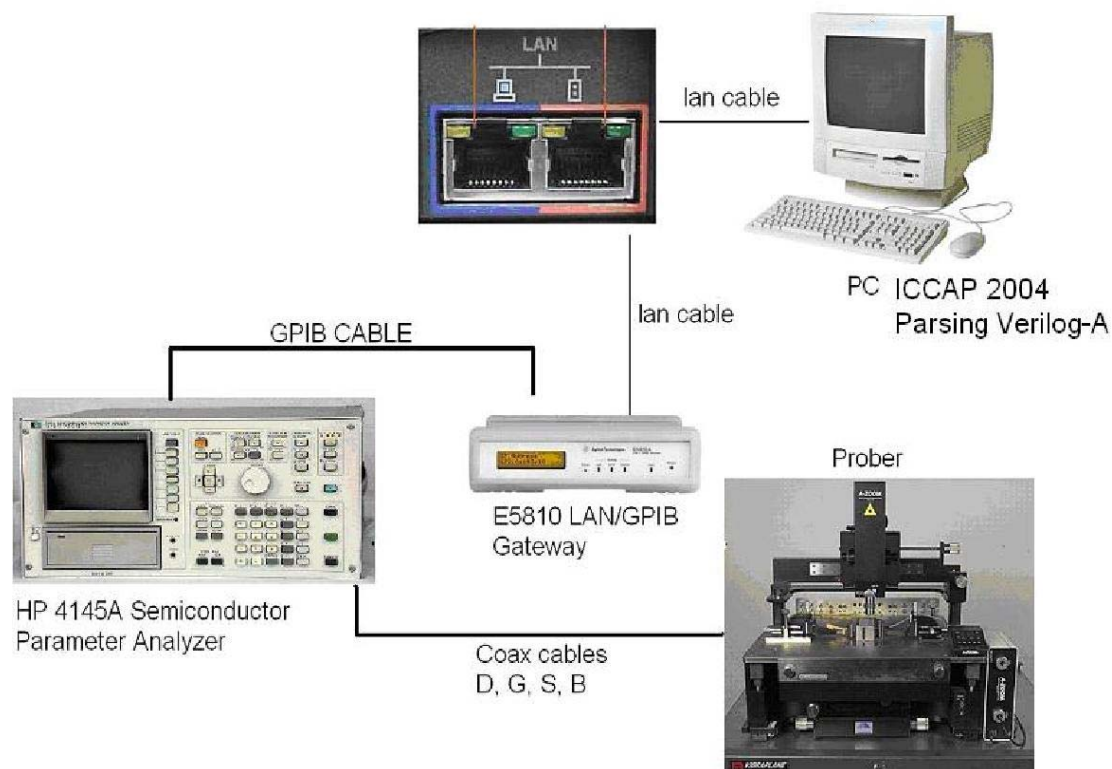
Στο Παράρτημα IV, υπάρχει αναφορά των setup που έγιναν για την μέτρηση του NMOS και του PMOS της CMOS τεχνολογίας 0.25 μ m. Υπάρχουν επίσης, προσομοιώσεις για τη συγκεκριμένη τεχνολογία και ένα σετ παραμέτρων.

Στο Παράρτημα V, υπάρχει αναφορά των setup που έγιναν για την μέτρηση του NMOS και του PMOS της CMOS τεχνολογίας 0.15 μ m. Υπάρχουν επίσης, προσομοιώσεις για τη συγκεκριμένη τεχνολογία καθώς και λίστα παραμέτρων για τη συγκεκριμένη τεχνολογία.

2. Συνδεσμολογία εργαστηρίου

Για να γίνουν οι μετρήσεις των τρανζίστορ και αργότερα να μπορεί να αναπτυχθεί το σύστημα για την εξαγωγή των παραμέτρων, θα πρέπει πρώτα να αναλυθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να γίνουν οι μετρήσεις των τρανζίστορ στον εργαστηριακό χώρο.

Η συνδεσμολογία στο εργαστήριο έγινε βάσει του παρακάτω σχήματος :



Σχ2.1 Συνδεσμολογία εξοπλισμού στο εργαστήριο

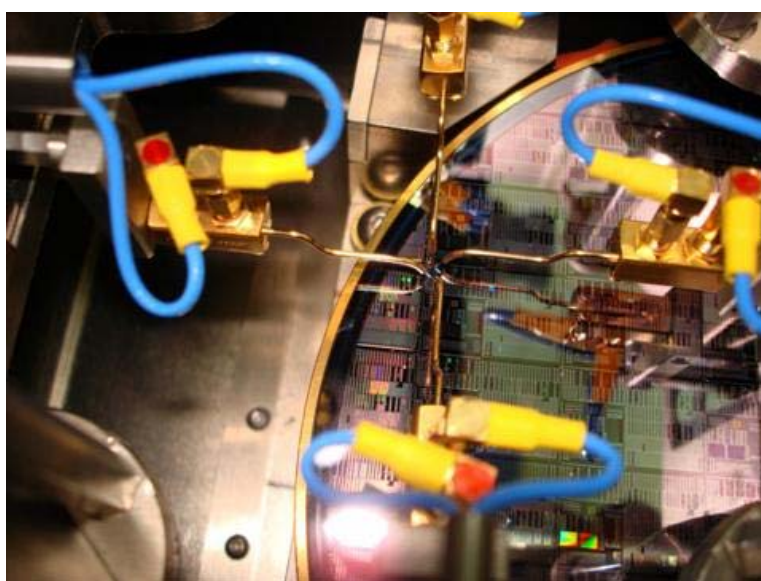
2.1 Prober Cascade Microtech Summit 10600

Το όργανο μέτρησης που διαθέτουμε στον εργαστηριακό χώρο είναι ο prober Cascade Microtech SUMMIT 10600. Εκεί, τοποθετείται το wafer όπου και βρίσκονται τα τρανζίστορ που είναι προς μέτρηση. Αναλόγως των manual που συνοδεύουν τα wafer, βρίσκουμε πού βρίσκονται τα τρανζίστορ που επιθυμούμε να

μετρήσουμε και εκεί εφαρμόζουμε τα 4 dc probes. Οι βελόνες αυτές ξύνουν το λεπτό στρώμα που βρίσκεται πάνω από το κάθε τρανζίστορ, κάνουν ηλεκτρική επαφή με αυτό, εφαρμόζεται η τάση που εμείς επιθυμούμε και δημιουργούνται ρεύματα, τα οποία εμείς μετράμε με τον αναλυτή παραμέτρων που διαθέτουμε.



Σχ.2.2 Prober Cascade Microtech Summit 10600



Σχ.2.3 Οι DC βελόνες επαφίζονται στο wafer

2.2 HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer

Ο αναλυτής παραμέτρων που διαθέτουμε στο εργαστήριο είναι ο HP 4145 Semiconductor Parameter Analyzer. Ο αναλυτής παραμέτρων διαθέτει θύρα για καλώδιο GPIB. Με αυτόν τον τρόπο συνδέουμε τον αναλυτή παραμέτρων με τον υπολογιστή μέσω του E5810 LAN/GPIB Gateway, η δουλειά του οποίου περιγράφηκε παραπάνω. Ο αναλυτής παραμέτρων συνδεόμενος με τον υπολογιστή, εφαρμόζει τις τάσεις που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε σε κάθε ένα από τα Drain, Gate, Source και Bulk στο 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.



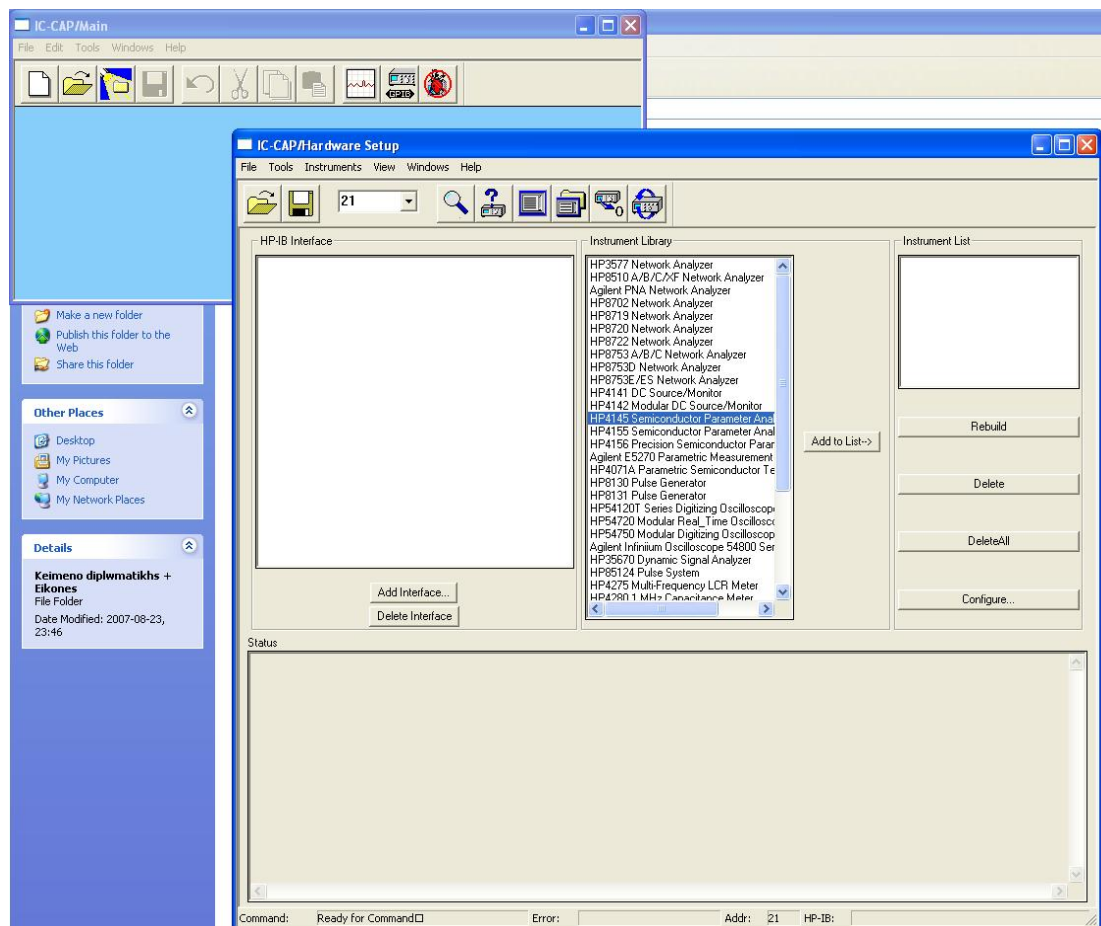
Σχ2.4. HP 4145A Semiconductor Parameter Analyzer

2.3 Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Agilent ICCAP2006B. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για να μπορούμε να θέσουμε τις τάσεις που εμείς επιθυμούμε στα Drain, Gate, Source, Bulk του τρανζίστορ προς μέτρηση, για να εμφανίσουμε τις γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων και των διαγωγιμοτήτων, και αργότερα για να δημιουργήσουμε τις βελτιστοποιήσεις που θα αποτελούν το σύστημα για την εξαγωγή παραμέτρων.

2.3.1 Agilent ICCAP 2006B

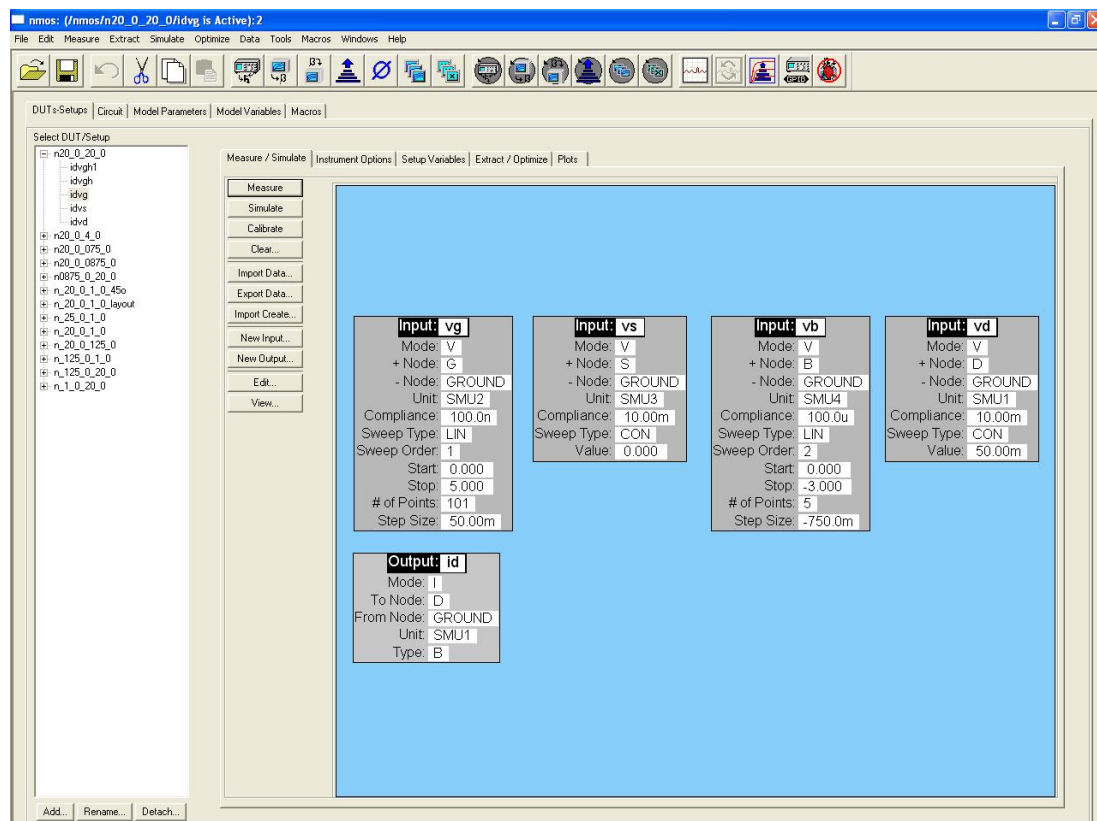
Ως πρώτο βήμα στο λογισμικό αυτό, έγινε το hardware setup έτσι ώστε να αναγνωρίζεται από το λογισμικό ότι ο υπολογιστής είναι συνδεδεμένος με τον αναλυτή παραμέτρων που διαθέτουμε.



Σχ2.5. Hardware setup για την αναγνώριση του αναλυτή παραμέτρων

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

Στην καρτέλα DUTs-Setups, δημιουργούμε τα DUT και μέσα σε αυτά τα επιθυμητά setup, όπου καθορίζουμε τις τάσεις που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Ένα παράδειγμα για την εφαρμογή των τάσεων είναι αυτό που ακολουθεί :



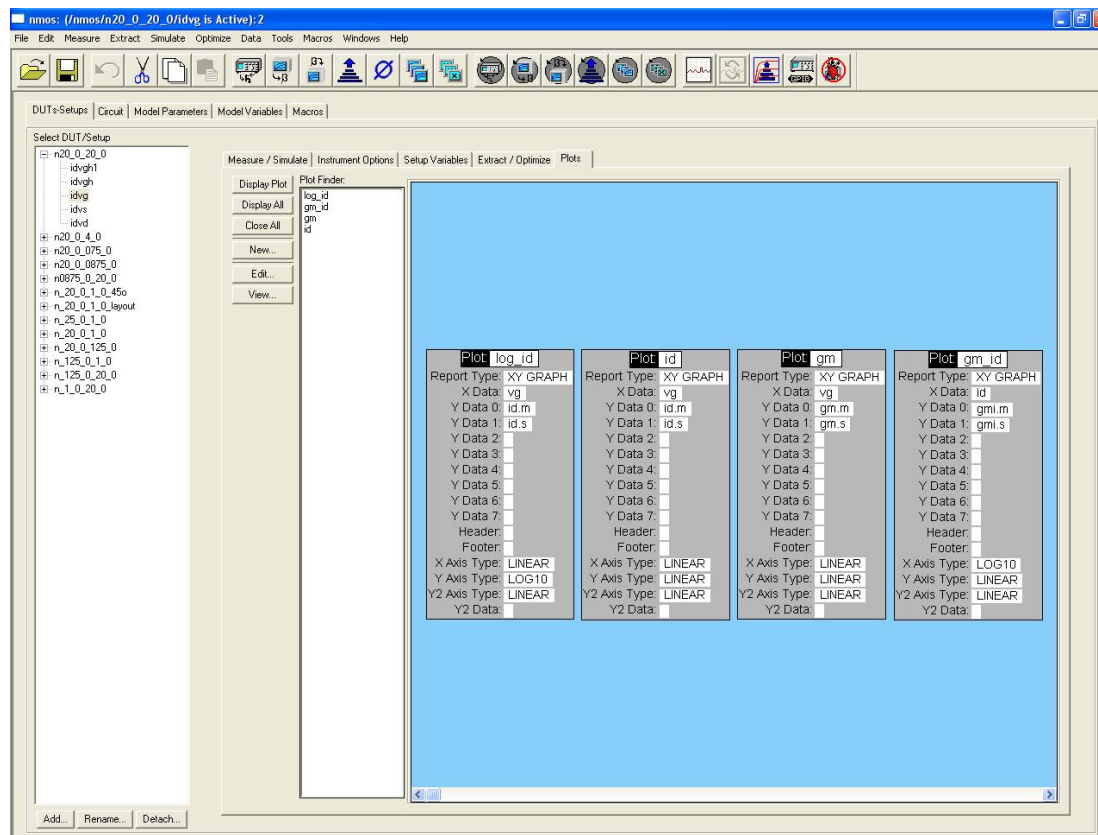
Σχ2.6. Εφαρμογή τάσεων μέσω του λογισμικού ICCAP

Στο άνωθεν παράθυρο, στο αριστερό μέρος δημιουργούμε με χαρακτηριστικά ονόματα κάποια DUT. Δίνουμε ονόματα στα DUT, έτσι ώστε να αναγνωρίζουμε τα μήκη (L) και τα πλάτη (W) του καναλιού του τρανζίστορ. Μέσα σε κάθε DUT, δημιουργούμε κάποια setup όπως το idvg, idvd, idvs.

Στο δεξί μέρος, φαίνεται το setup των τάσεων που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε. Αναλύοντας την τάση που εφαρμόζεται ως είσοδος στο Gate (τάση vg), βλέπουμε 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 ποιά τιμή θα ξεκινήσει και σε ποιά 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.

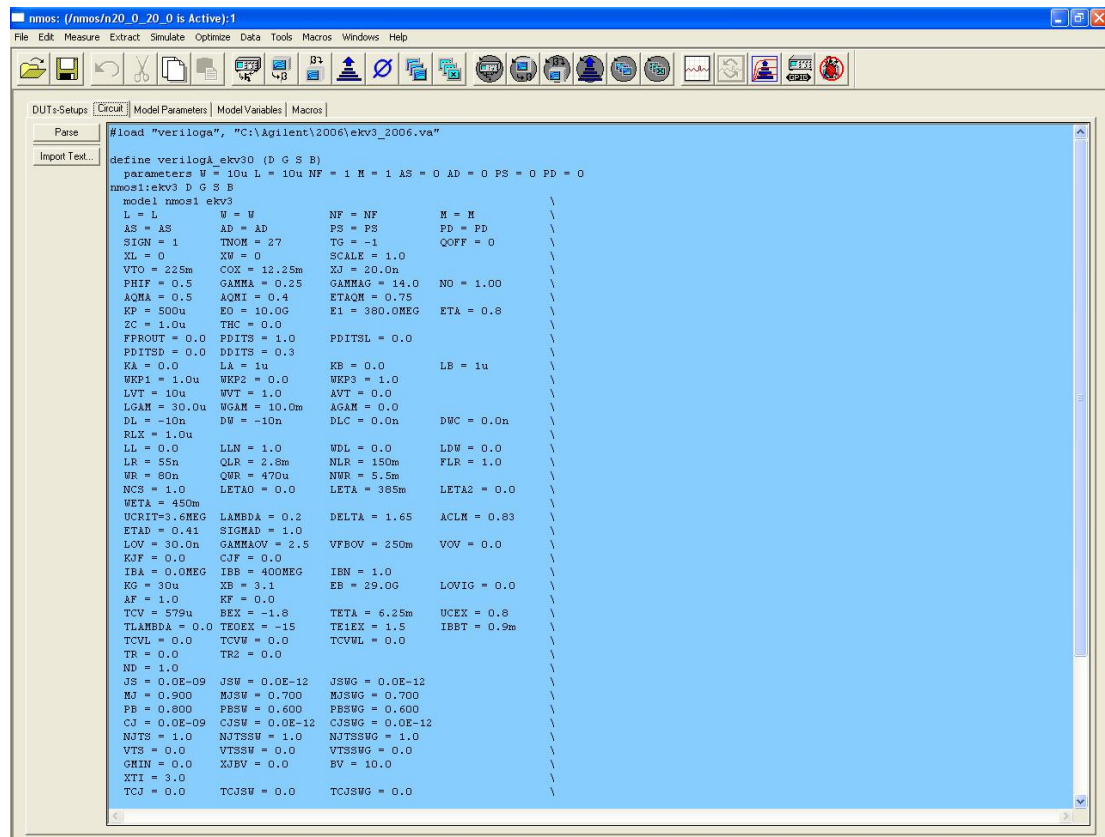
Ως έξοδο, επιλέγουμε ποιό ρεύμα επιθυμούμε να δούμε στις γραφικές παραστάσεις που θα δημιουργηθούν.

Επόμενο βήμα στο λογισμικό είναι να καθορίσουμε τις γραφικές παραστάσεις που θέλουμε να παρατηρήσουμε. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, οι γραφικές παραστάσεις που μας ενδιαφέρουν να δούμε είναι οι γραφικές των ρευμάτων σε weak και σε strong inversion και οι διαγωγιμότητες των ρευμάτων αυτών.



Σχ2.7. Δημιουργία γραφικών παραστάσεων

Στην καρτέλα Circuit του λογισμικού φορτώνουμε τον Verilog-A κώδικα, ο οποίος περιγράφει πλήρως το EKV3 μοντέλο. Παράλληλα προσθέτουμε και τις παραμέτρους, που βρίσκονται ήδη στον .va κώδικα.



Σχ2.8. Προσθήκη .va κώδικα – Προσθήκη παραμέτρων

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 EKV3 να συγκλίνουν με τις γραφικές παραστάσεις που παράγονται μετά την διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων. 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	Value	Min	Max	Memory Stored
nmos1.SIGN	1.000			1.000
nmos1.TNOM	20.00			27.00
nmos1.TG	-1.000			-1.000
nmos1.QOFF	0.000			0.000
nmos1.XL	0.000			0.000
nmos1.XW	0.000			0.000
nmos1.SCALE	1.000			1.000
nmos1.VTO	550.0m			225.0m
nmos1.COX	1.725m			12.25m
nmos1.XJ	50.00n			20.00n
nmos1.PHIF	380.0m			500.0m
nmos1.GAMMA	670.0m			250.0m
nmos1.GAMMAG	25.00			14.00
nmos1.NO	1.000			1.000
nmos1.AQMA	0.000			500.0m
nmos1.AQMI	0.000			400.0m
nmos1.ETAQM	750.0m			750.0m
nmos1.KP	106.0u			500.0u
nmos1.EO	400.0MEG			10.000
nmos1.E1	128.0MEG			380.0MEG
nmos1.ETA	500.0m			800.0m
nmos1.ZC	1.000u			1.000u
nmos1.THC	0.000			0.000
nmos1.FPROUT	0.000			0.000
nmos1.PDITS	0.000			1.000
nmos1.PDITSL	0.000			0.000
nmos1.PDITSLD	0.000			0.000
nmos1.DDITS	300.0m			300.0m
nmos1.KA	0.000			0.000
nmos1.LA	1.000u			1.000u
nmos1.KB	0.000			0.000
nmos1.LB	1.000u			1.000u
nmos1.WKP1	1.000u			1.000u
nmos1.WKP2	45.00a			0.000
nmos1.WKP3	1.000			1.000
nmos1.LVT	10.00u			10.00u
nmos1.WVT	1.000			1.000
nmos1.AVT	0.000			0.000
nmos1.LGAM	30.00u			30.00u

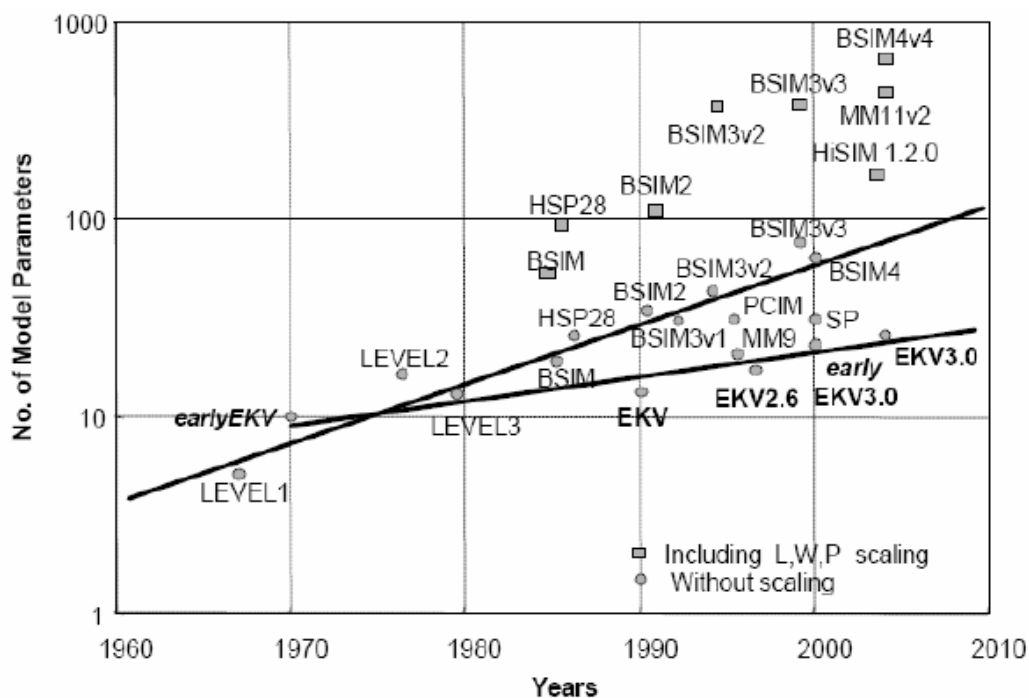
Σχ2.9. Λίστα παραμέτρων προς εξαγωγή

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

Τέλος, στην καρτέλα Macros έχουν γραφτεί οι μακροεντολές, οι οποίες θα καλούν κάποιες εντολές και λειτουργίες του λογισμικού. Επίσης, θα είναι αυτές που θα καλούν τα κατάλληλα optimizations, τα οποία θα διαμορφωθούν έτσι ώστε να υπάρχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Παραδείγματα μακροεντολών θα δειχθούν αργότερα, έτσι ώστε να γίνει σαφές ποιές λειτουργίες του προγράμματος θα κληθούν, ποιές είναι οι ενέργειες που θα γίνουν και με ποιά σειρά αυτό θα επιτευχθεί.

3. EKV3 Μοντέλο

Στην διπλωματική αυτή εργαστήκαμε με το μοντέλο EKV3. Το μοντέλο αυτό πρωτοξεκίνησε να εφαρμόζεται κατά την δεκαετία του 1970. Από πολύ νωρίς εισήχθησαν κανονικοποιημένες μορφές για το ρεύμα αλλά και για τις τάσεις.[1] Από τις πρώτες κιόλας εκδόσεις, το μοντέλο είχε προσομοιάσει 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 κυκλωμάτων. Το μοντέλο αυτό είναι βασισμένο στην Φυσική και ισχύει για όλο το φάσμα λειτουργίας του MOSFET. Περιέχει απλές αλλά αναλυτικές εξισώσεις και καλύπτει πολλά από τα φαινόμενα και τη συμπεριφορά του μοντέλου σε ασθενή, μέτρια και ισχυρή αναστροφή. Το μοντέλο EKV3 υπάρχει διαθέσιμο σε μορφή Verilog-A κώδικα. Η έκδοση του μοντέλου με την οποία εργαστήκαμε είναι η `ekv300_02.va`. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί πως το μοντέλο έχει όσο το δυνατόν λιγότερες παραμέτρους και όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα, έχει πολύ λιγότερες παραμέτρους από αντίστοιχα μοντέλα. [2]



Σχ3.1. Αριθμός παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου

3.1 Ορισμός βασικών μεγεθών του ΕΚV3

Παρακάτω ορίζονται τα βασικά μεγέθη του μοντέλου [2] :

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

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

- ο Δυναμικό επαφής V_{FB} [V] που δίνεται από την εξίσωση : $V_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q'_{OX}}{C'_{OX}}$
- ο Θερμοδυναμική τάση U_T [V] : $U_T = \frac{kT}{q}$, με q το φορτίο του ηλεκτρονίου, k τη σταθερά Boltzmann
- ο Δείκτης σώματος γ [$\text{V}^{-1/2}$] : $\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{SI}N_{SUB}}}{C'_{OX}}$
- ο 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}
- ο 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 $V_G - V_{FB} = \Psi_s + \gamma \sqrt{\Psi_s} - \frac{Q'_i}{C'_{OX}}$

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

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

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

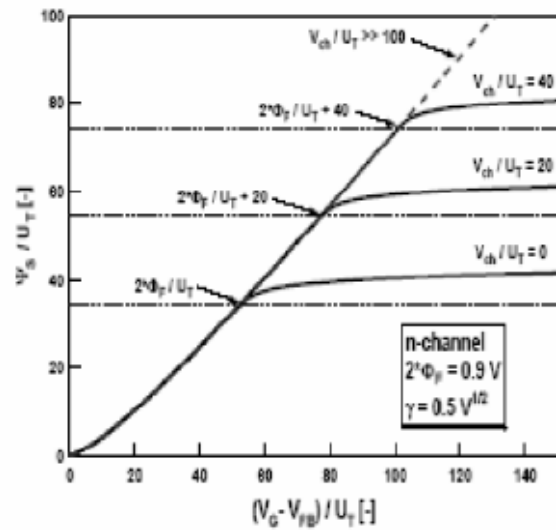
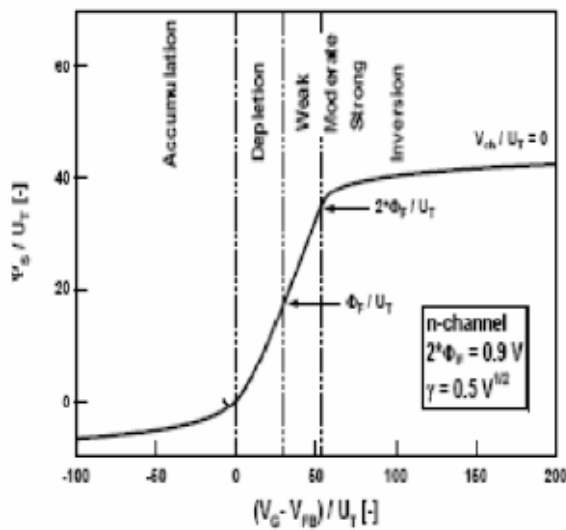
- ο Κλίση n : $n = \left[\frac{\partial \Psi_{SP}}{\partial V_G} \right]^{-1} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\Psi_{SP}}} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\Psi_0 + V_P}}$

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

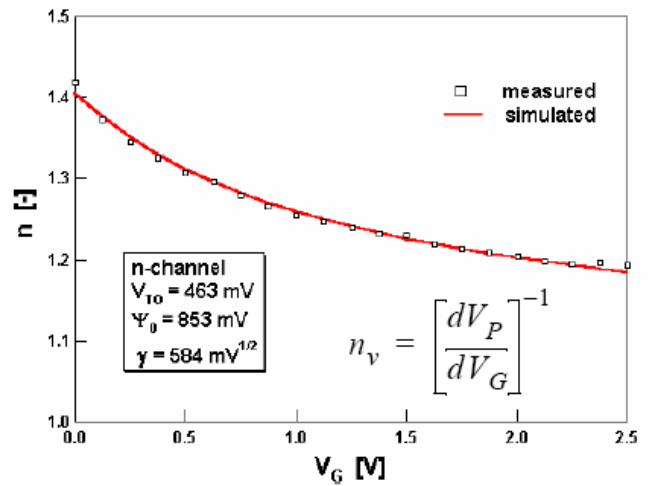
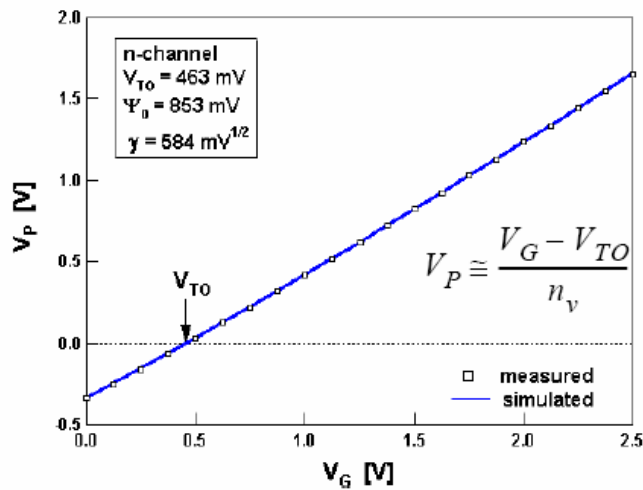
Από τα παραπάνω, προκύπτει : $V_P = V'_G - \Psi_0 - \gamma \left(\sqrt{V'_G + \frac{\gamma^2}{4}} - \frac{\gamma}{2} \right)$ και

$V'_G = V_G - V_{FB} = V_G - V_{TO} + \Psi_0 + \gamma\sqrt{\Psi_0}$. Μια πολύ χρήσιμη προσέγγιση της

V_P είναι : $V_P \cong \frac{V_G - V_{TO}}{n}$



Σχ3.2. Λειτουργία του MOSFET ανάλογα με $V_G, V_{FB}, \Phi_F, V_{CH}$



Σχ3.3. V_P vs V_G , n vs V_G

3.2 Ρεύμα καναλιού

Το ρεύμα στο κανάλι δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

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

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

Με μια γραμμική προσέγγιση, έχουμε :

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

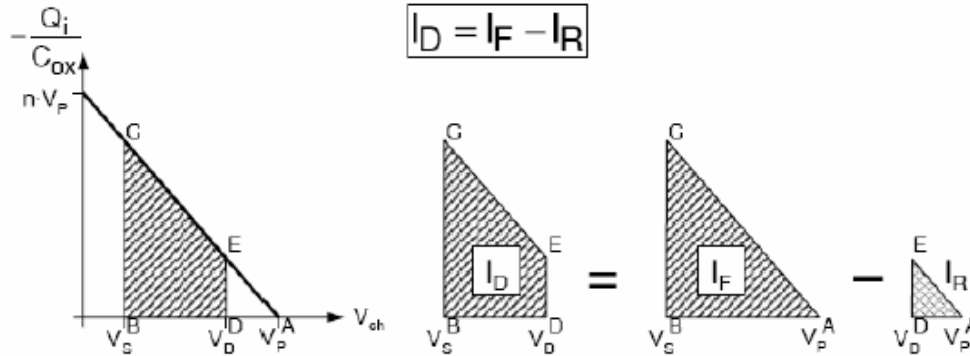
Ενώ συνδέοντας τα παραπάνω έχουμε :

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

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

$$= I_F - I_R$$

με I_F και I_R τα ρεύματα forward και reverse αντίστοιχα.



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

Είναι καλό αυτή τη στιγμή να ορίσουμε με τι ισούνται τα κανονικοποιημένα ρεύματα forward και reverse.

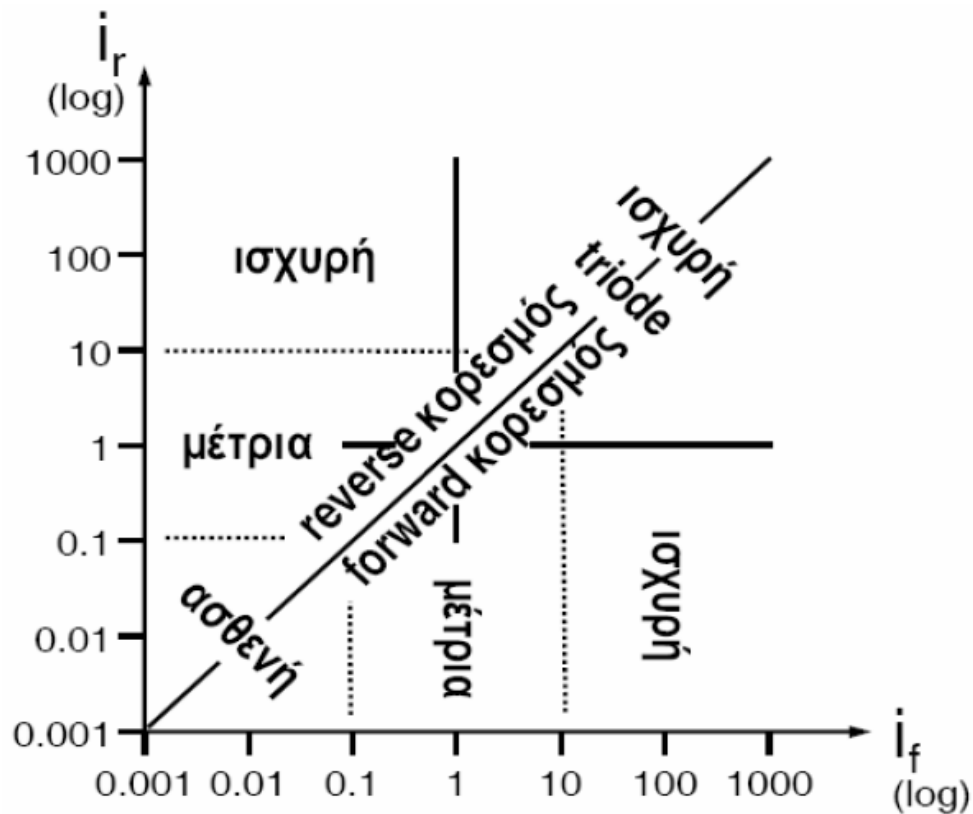
$$I_D = I_{SPEC} (i_f - i_r) \quad \text{με } I_{SPEC} = 2n\beta U_T^2, \quad \beta = \mu_n \frac{C_{ox} W}{L} \text{ και } U_T = \frac{kT}{q}$$

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

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

Τα φορτία q_s και q_D δίνονται από τις εξισώσεις :

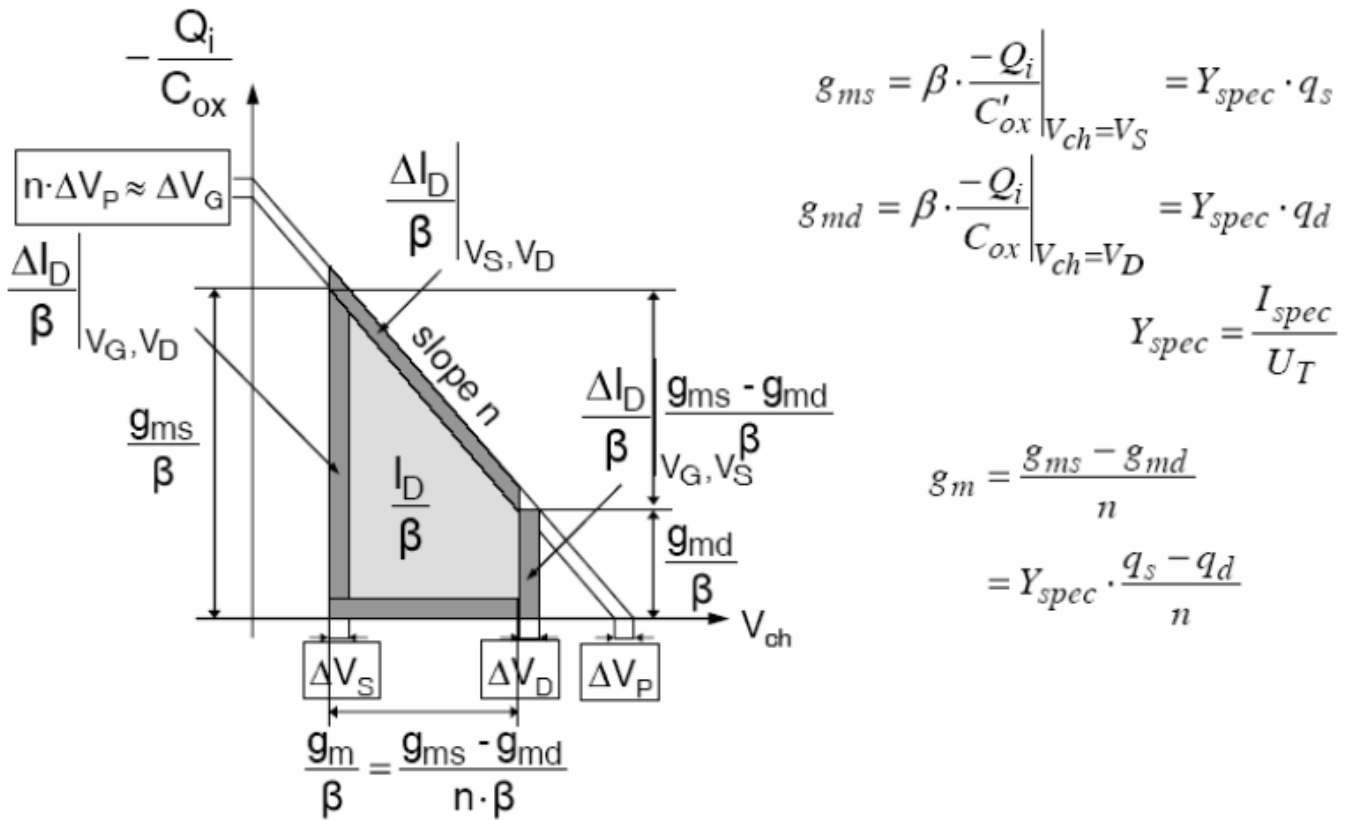
$$q_s = \frac{Q_{is}}{Q_{SPEC}}, q_D = \frac{Q_{iD}}{Q_{SPEC}} \text{ με } q_i = \frac{Q_i}{Q_{SPEC}} \text{ και } Q_{SPEC} = -2n C_{OX} U_T$$



Σχ3.4 Επίπεδα αναστροφής MOS τρανζίστορ (ως προς τα κανονικοποιημένα ρεύματα i_r και i_f)

3.3 Διαγωγιμότητες και φορτία

Στο σχήμα παρακάτω φαίνονται οι διαγωγιμότητες του τρανζίστορ :



Σχ3.5 Ορισμός διαγωγιμοτήτων του τρανζίστορ

3.4 Φαινόμενα που καλύπτονται από το EKV μοντέλο

Υπάρχουν κάποια μη ιδανικά φαινόμενα, τα οποία ενδεχομένως επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση του MOSFET. Έχει εισαχθεί όμως ένα πλήθος παραμέτρων για να αντιμετωπίσει αυτά τα φαινόμενα, έτσι ώστε η μοντελοποίησή τους από το EKV 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.

- Δύο είναι τα κύρια φαινόμενα που περιορίζουν την κινητικότητα των ηλεκτρονίων για NMOS, των οπών για PMOS:

- Με το κάθετο πεδίο λόγω scattering. Η κινητικότητα των ηλεκτρονίων ή οπών περιορίζεται όταν το κάθετο πεδίο είναι πολύ μικρό ή πολύ μεγάλο, ιδιαίτερα με υψηλό N_{SUB} , χαμηλή θερμοκρασία. Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, η κινητικότητα μειώνεται, καθώς αυξάνονται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων (οπών) με τον κρύσταλλο.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, έχουν εισαχθεί οι παράμετροι KP, EO, E1, ETA, ZC, THC.

- Με το οριζόντιο πεδίο λόγω Velocity Saturation. Αυτό αποτελεί την κυριότερη αιτία περιορισμού του ρεύματος, ιδιαιτέρως για τρανζίστορ μικρού μήκους και παρατηρείται κυρίως στα NMOS.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, έχει εισαχθεί η παράμετρος UCRIT.

- Φαινόμενο διαμόρφωσης μήκους καναλιού L (Channel length modulation)
Χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι ότι αυξάνεται η αγωγιμότητα εξόδου του τρανζίστορ σε περιοχή κορεσμού (strong inversion). Επίσης, συνδέεται τόσο με το velocity saturation όσο και με το δισδιάστατο 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.

- Αλλαγή του φαινομένου σώματος (Charge share effect)

Παρατηρείται μια μείωση της τιμής της παραμέτρου GAMMA για μικρό L, και η αύξησή της για μικρό W.

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

- Drain Induced Barrier Lowering (DIBL)

Αυτό που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι η μείωση της τάσης κατωφλίου όταν έχουμε αυξημένη τάση V_{DS} .

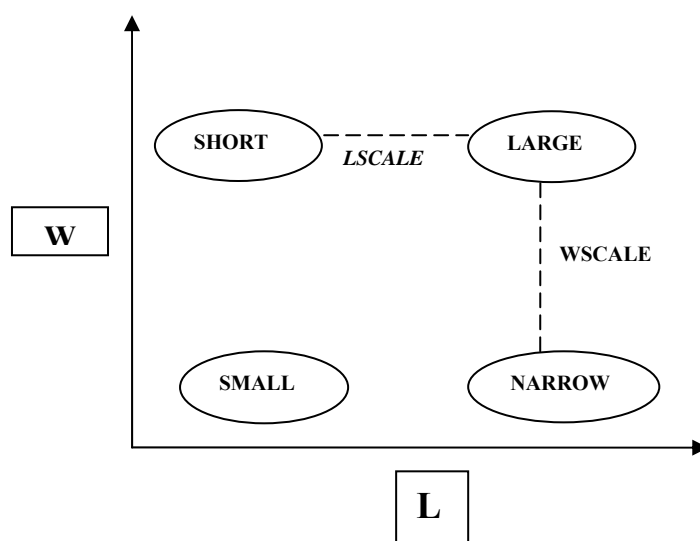
Για να αντιμετωπιστεί το DIBL effect έχει εισαχθεί στο μοντέλο η παράμετρος ETAD καθώς και η παράμετρος SIGMAD.

Στο Παράρτημα I, παρατίθεται ένας πίνακας, όπου αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι που έχουν εισαχθεί στο EKV3 μοντέλο και οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στον verilog-A κώδικα, οι κατηγορίες στις οποίες αυτές κατατάσσονται, καθώς και τα αντίστοιχα φαινόμενα για τα οποία έχουν εισαχθεί οι παράμετροι αυτές [3].

3.5 Λειτουργία του EKV3 μοντέλου

Αρχικά, για να μπορεί να γίνει η κατανόηση του EKV3 μοντέλου, θα πρέπει αρχικά να γίνει αντιληπτό το πώς συμπεριφέρεται και το τι επιρροή έχει στην προσομοίωσή του η όποια αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων. Στο Παράρτημα II, εμφανίζονται γραφικές παραστάσεις, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί στο λογισμικό ICCAP, όπου απεικονίζεται το πώς επηρεάζεται το μοντέλο EKV3 από την αύξηση ή την μείωση των βασικών του παραμέτρων.

Στη συνέχεια, προσομοιώσαμε το EKV3 μοντέλο, με προσομοιωτή τύπου Spice από το πρόγραμμα ADS, σε όλες τις διαθέσιμες γενιές CMOS τεχνολογιών, σε όλες τις γεωμετρίες τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS τρανζίστορ. Αυτό έγινε δίνοντας συγκεκριμένες τιμές στις παραμέτρους του EKV3 μοντέλου. Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε στις τεχνολογίες 1um, 0.25u, 0.11um, οι οποίες και μετρήθηκαν εντός του εργαστηριακού χώρου, ενώ υπάρχουν αποτελέσματα προσομοιώσεων και για άλλες γενιές τεχνολογιών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν την εγκυρότητα του EKV3 μοντέλου, καθιστώντας το αξιόπιστο σε όλες τις περιοχές λειτουργίας ενός τρανζίστορ, καθώς και σε όλες τις γεωμετρίες. 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.



Σχ4.2 Γεωμετρίες για λεπτομερή εξέταση

Στο Παράρτημα II, παρουσιάζονται αναλυτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα. Παράλληλα, υπάρχουν ολοκληρωμένα και τα σετ παραμέτρων για τις αντίστοιχες τεχνολογίες.

3.6 Συμπερασματικά για το EKV3 μοντέλο

Μπορούμε να καταλάβουμε από την ανάλυση που έχει γίνει για το EKV3 μοντέλο πως η προσομοίωση των κυκλωμάτων που βασίζονται στο μοντέλο αυτό προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Το μοντέλο είναι πολύ απλό, βασισμένο στην φυσική. Συγκεντρωτικά μπορούμε να συνοψίσουμε τα αρκετά πλεονεκτήματα του EKV3 μοντέλου:

- Καλύπτει όλο το ευρύ φάσμα λειτουργίας του τρανζίστορ (από ασθενή σε μέτρια και σε ισχυρή αναστροφή)
- Το μοντέλο βασιζόμενο στην φυσική, έχει λίγες παραμέτρους σε σχέση με άλλα σύγχρονα μοντέλα. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί πως χρησιμοποιώντας το μοντέλο BSIM3 απαιτείται η ύπαρξη 100 περίπου παραμέτρων μόνο για το intrinsic DC μοντέλο, ενώ για το ίδιο μοντέλο, χρησιμοποιώντας το EKV3, απαιτείται η ύπαρξη μόνο 18 παραμέτρων[5]. Το μοντέλο EKV3 διέπεται από πολύ απλές αλλά αναλυτικές εξισώσεις.

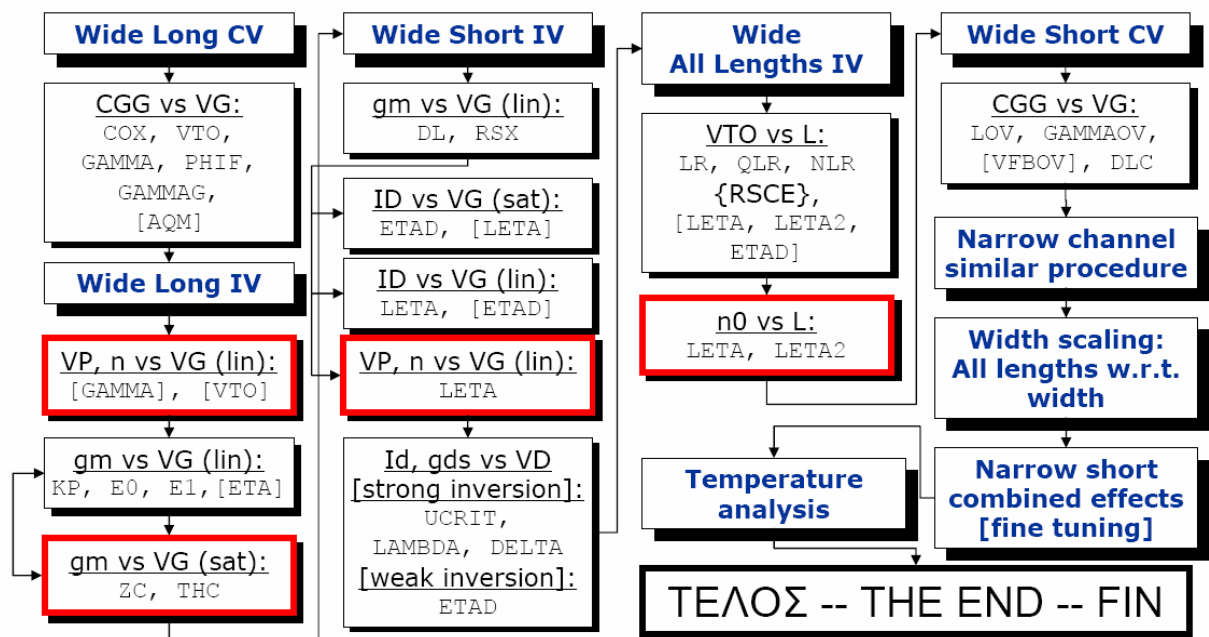
- Γίνεται πολύ καλή μοντελοποίηση των μη γραμμικών φαινομένων, τα οποία ίσως επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση του τρανζίστορ.
- Το EKV3 μοντέλο καλύπτει όλες τις γενιές τρανζίστορ CMOS τεχνολογιών. Έχει δοκιμαστεί ως τώρα σε διαφορετικές γενιές τρανζίστορ (1 μ m, 0.5 μ m, 0.35 μ m, 0.25 μ m, 0.15 μ m, 0.11 μ m, 90nm) με ιδιαιτέρως καλά αποτελέσματα σε όλες από αυτές, καθιστώντας το μοντέλο έγκυρο και αξιόπιστο.

4. Εξαγωγή παραμέτρων

Η διπλωματική αυτή έχει ως κύριο στόχο να μελετηθεί ένα σύστημα το οποίο να εξαγάγει, με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση, τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στο EKV3 μοντέλο.

4.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων

Η υλοποίηση του συστήματος αυτού βασίζεται στην λεπτομερή μεθοδολογία εξαγωγής παραμέτρων που έχει αναπτυχθεί από τους A.Bazigos, M.Bucher [4]. Η εικόνα που ακολουθεί περιγράφει σε ένα διάγραμμα ροής αναλυτικώς το τι πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να εξαχθούν βήμα-βήμα οι σωστές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου EKV3.



Σχ4.1 Διάγραμμα ροής εξαγωγής παραμέτρων EKV3

Το παραπάνω σχήμα δείχνει βήμα-βήμα το σύστημα, σύμφωνα με το οποίο γίνεται η εξαγωγή παραμέτρων έχοντας ήδη τις μετρήσεις. Ο στόχος κάθε φορά είναι να αλλάξουμε τις τιμές της κάθε παραμέτρου, έτσι ώστε το αποτέλεσμα της

προσωμοίωσης να προσεγγίζει κάθε φορά τις γραφικές παραστάσεις που δημιουργούνται από τις μετρήσεις που έχουν γίνει.

Αναλύοντας αυτό το διάγραμμα ροής, χρησιμοποιούμε τις CV μετρήσεις των wide long γεωμετριών, ώστε να εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων COX, VTO, GAMMA, PHI, GAMMA, GAMMAG. Ύστερα, από τις μετρήσεις σε wide long γεωμετρία, και από την γραφική παράσταση V_p vs V_G , βελτιώνουμε τις τιμές των GAMMA, VTO. Από την γραφική παράσταση της διαγωγιμότητας g_m vs V_g σε linear mode, εξάγουμε τις παραμέτρους KP, E0, E1, ETA, ενώ σε saturation mode εξάγουμε τις ZC, THC. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του wide short μοντέλου, και κοιτάζοντας τις γραφικές παραστάσεις g_m vs $V_g(\text{lin})$, I_d vs $V_g(\text{lin})$, I_d vs $V_g(\text{sat})$, V_p vs V_g , I_d vs V_d , g_{ds} vs V_d (σε strong και σε weak inversion), εξάγουμε τις τιμές των παραμέτρων DL, RLX, ETAD, LETA, UCRIT, LAMBDA, DELTA. Ύστερα, κοιτώντας όλες τις γεωμετρίες με διάφορες τιμές L και μεγάλου W (wide/long, wide/short) εξάγονται οι τιμές των παραμέτρων LR, QLR, NLR ενώ παράλληλα βελτιώνονται και οι τιμές των LETA, ETAD. Χρησιμοποιώντας τις wide short CV μετρήσεις, εξάγουμε τις παραμέτρους LOV, GAMMAOV, DLC. 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. Εν συντομία, από τις μετρήσεις σε narrow/long εξάγονται οι παράμετροι DW, WETA, WE0, WE1, από all widths/long οι παράμετροι WR, QWR, NWR, από την narrow/short οι WDL, WUCRIT, WRLX, WLAMBDA, από την all widths/short οι WLR, WQLR, WNLR, από την narrow/all lengths οι παράμετροι LWR, LQWR, LNWR. Τέλος, το σύστημα εξαγωγής παραμέτρων ολοκληρώνεται με την ανάλυση της θερμοκρασίας. 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 Εκτέλεση των optimizations

Βάσει του σχήματος 4.1, καταλήγουμε στο να δημιουργήσουμε μια αλληλουχία βελτιστοποιήσεων, οι οποίες όταν εκτελεστούν θα μας δίνουν μία εκτίμηση για τις

τιμές των βασικών παραμέτρων του EKV3 μοντέλου. Στις βελτιστοποιήσεις αυτές, πρέπει κάθε φορά να καθορίζουμε τις παραμέτρους, των οποίων τις τιμές βελτιστοποιούμε, καθώς και το σε ποιά γεωμετρία αυτές (οι βελτιστοποιήσεις) εκτελούνται. Πρέπει, επίσης, να στοχεύουμε σε συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις και όχι σε όλες. Η επιλογή των κριτηρίων αυτών έγινε με το πώς επηρεάζει η κάθε παράμετρος το μοντέλο και σε ποιές γεωμετρίες. Τέλος, επιλέγουμε αν θα βελτιστοποιήσουμε ως προς το σχετικό ή το απόλυτο λάθος. Το κριτήριο αυτό βασίζεται ως προς το σε ποιά περιοχή αναστροφής επιθυμούμε να ρίξουμε το βάρος μας. Αν επιθυμούμε καλύτερα αποτελέσματα στην ασθενή αναστροφή, επιλέγουμε relative error, ενώ επιλέγουμε absolute error αν ενδιαφερόμαστε κυρίως για την ισχυρή αναστροφή. Στόχος των βελτιστοποιήσεων είναι να ελαχιστοποιηθεί το RMS error όσο το δυνατόν περισσότερο, δίνοντας όλο και πιο πολύ καλή προσέγγιση στις τιμές των παραμέτρων, των οποίων οι τιμές βελτιστοποιούνται. Επίσης, είναι καλό να ειπωθεί πως επειδή μας αφορά περισσότερο η περιοχή κορεσμού από την γραμική περιοχή του τρανζίστορ, είναι αποδεκτά κάποια trade-offs έτσι ώστε να υπάρχουν καλύτερα αποτελέσματα σ' αυτήν την περιοχή.

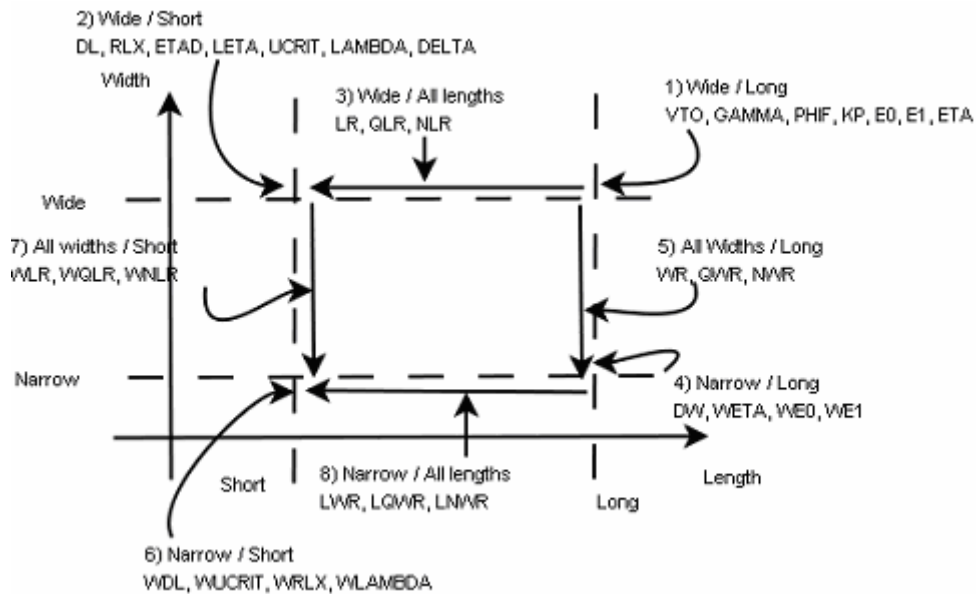
Επίσης, είναι γεγονός πως μια βελτιστοποίηση μπορεί να χρειαστεί να εκτελεστεί σε περισσότερα από ένα βήματα ή να εκτελεστούν τα βήματα σε μορφή loop κάποιες φορές. Αυτό γίνεται περισσότερο για refining των τιμών των παραμέτρων και για απόδοση σωστότερων τιμών.

Παραθέτουμε, λοιπόν, παρακάτω σε μορφή πίνακα τις βελτιστοποιήσεις, με τη σειρά που αυτές εκτελέστηκαν :

Γεωμετρία	Παράμετροι	Στόχοι	Relative / Absolute Error
Wide / Long	VTO, GAMMA, PHIF, KP, E0, E1	idvg/id, idvg/gm	Relative
	KP, E0, E1, ETA	idvg/id, idvg/gm, idvgh/sqrt(id), idvgh/gm	Absolute
Wide / Short	DL, RLX, QLR, NLR, LETA	idvg/id, idvg/gm, idvg/log(id)	Absolute

	QLR, NRL, LETA	idvg/id	Relative
	UCRIT, LAMBDA, DELTA, LETA, ETAD, DL, RLX	idvgh/sqrt(id), idvgh/log(id), idvgh/id, idvg/log(id), idvg/id, idvd/id, idvd/log(gds)	Absolute
Wide / All Lengths	VTO, GAMMA, LR, WLR, NLR	idvg/id	Relative
Narrow / Long	DW, WETA, WE0, WE1	idvg/log(id), idvg/id, idvg/gm	Relative
All Widths / Long	WR, QWR, NWR	idvg/id	Relative
Narrow / Short	WDL, WRLX, WUCRIT, WLAMBDA	idvg/id, idvgh/id, idvgh/log(id), idvd/id	Absolute
All Widths / Short	WLR, WQLR, WNLR	idvg/id	Relative
Narrow / All Lengths	LWR, LQWR, LNWR	idvg/id, idvg/gm	Relative

Τα βήματα για την παραγωγή του συστήματος για την εξαγωγή παραμέτρων, συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα :

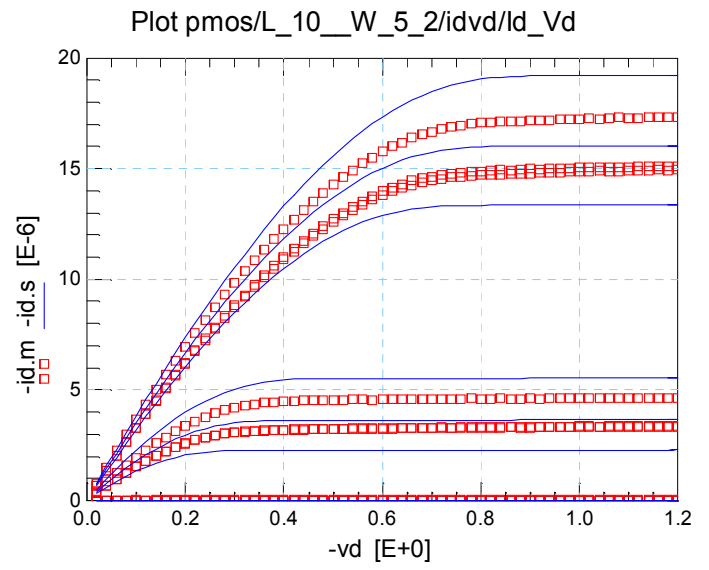
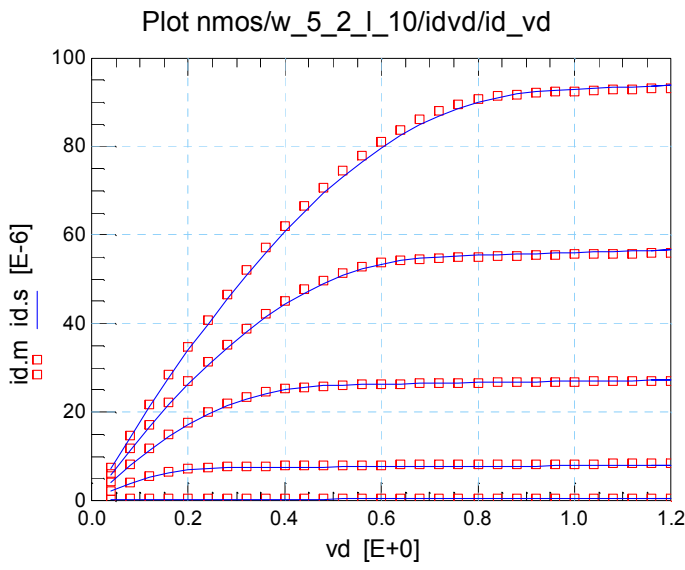
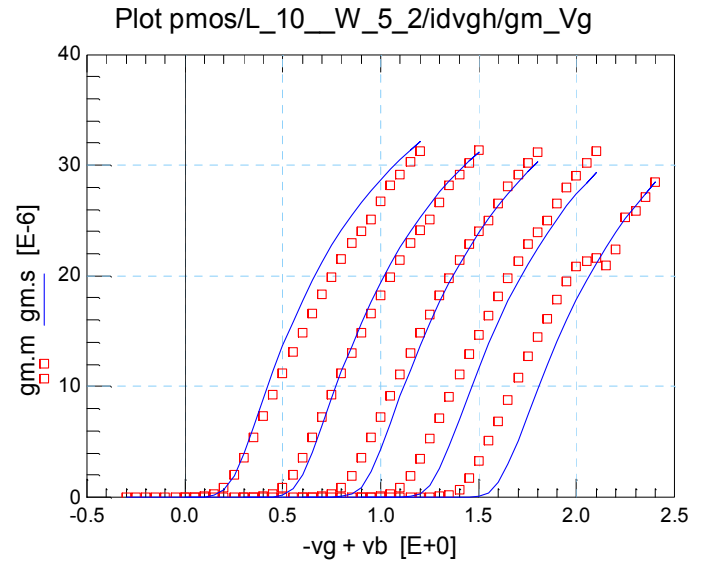
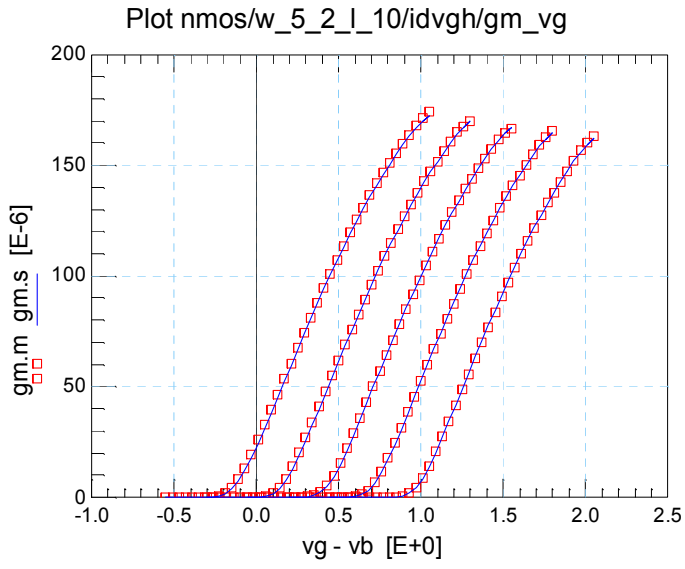
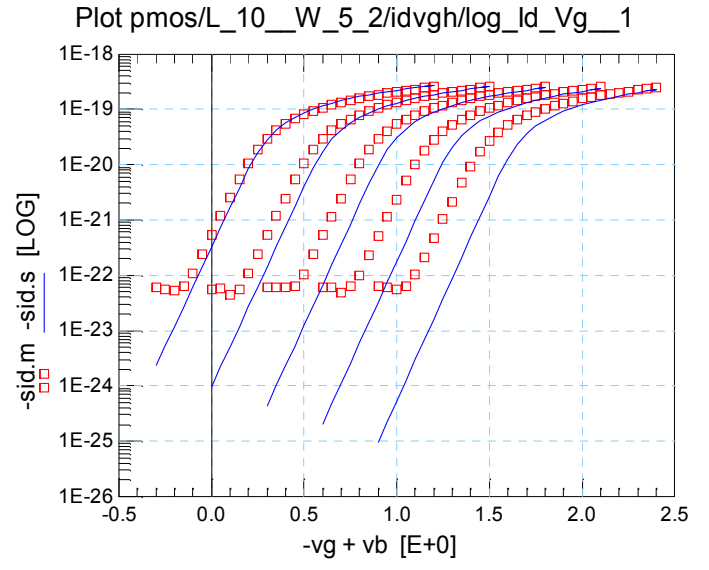
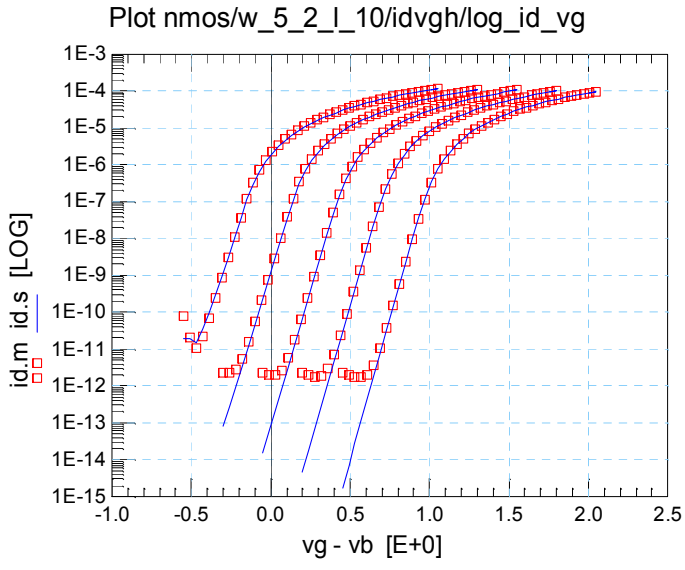


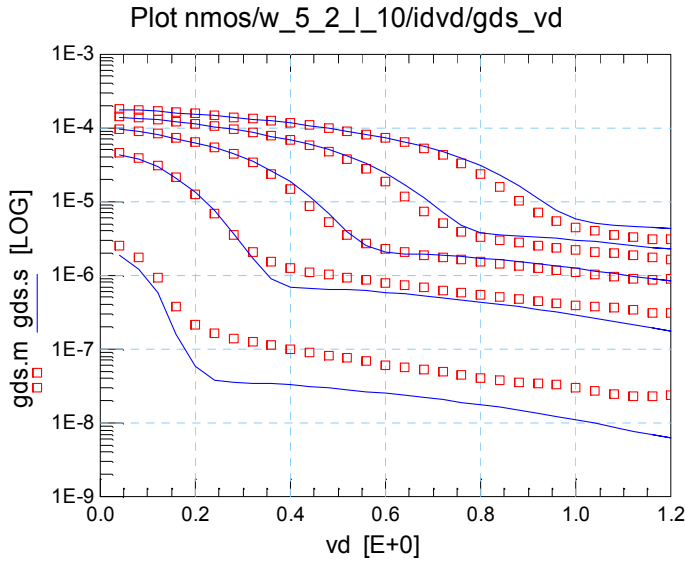
Σχ4.2 Σύστημα ατόματης εξαγωγής παραμέτρων

Παραπάνω, βρίσκονται οι βελτιστοποιήσεις. Αυτές δημιουργούνται και καλούνται μέσω μακροεντολών, μέσα στο λογισμικό ICCAP 2006B, που χρησιμοποιούμε. Η αλληλουχία των βελτιστοποιήσεων είναι αυτή ακριβώς, όπως περιγράφεται παραπάνω, έτσι ώστε να υπάρχει η καλύτερη δυνατή προσέγγιση στις τιμές των παραμέτρων. Η εκτέλεση των optimization αυτών, ισχύει τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, και σε όλο το εύρος των τεχνολογιών.

Διαθέσιμες τεχνολογίες είναι αυτή της 1um και της 0.25um. Και στις δύο αυτές τεχνολογίες, εφαρμόστηκαν οι βελτιστοποιήσεις που αναφέρονται παραπάνω και με τη συγκεκριμένη σειρά. Τα αποτελέσματα του σαι παραμέτρων μπορεί να είναι τελείως διαφορετικά από αυτά που έχουμε εξάγει μόνοι μας. Αυτό είναι λογικό, καθώς σε αυτήν την περίπτωση καλείται το πρόγραμμα να δώσει το καλύτερο δυνατό συνδυασμό τιμών για τις παραμέτρους.

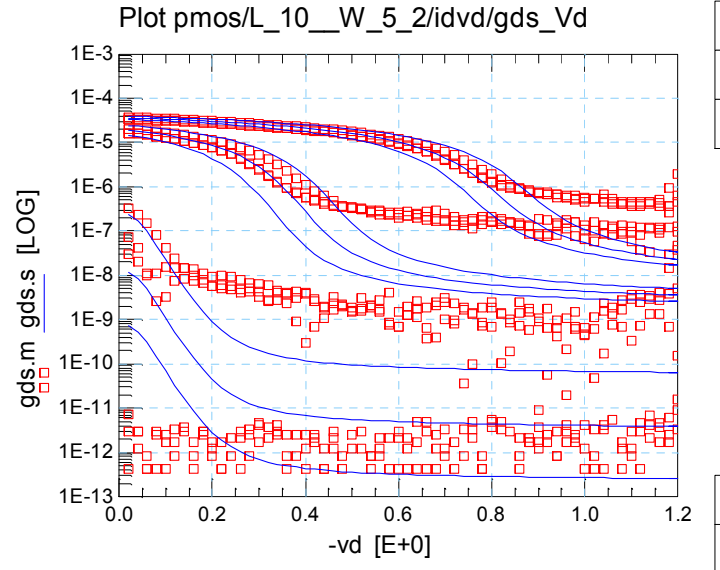
Οι ακόλουθες χαρακτηριστικές δημιουργήθηκαν μετά την εκτέλεση των βελτιστοποιήσεων : (Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις του wide/long και wide/short στις τεχνολογίες 0.11um, 0.25um)





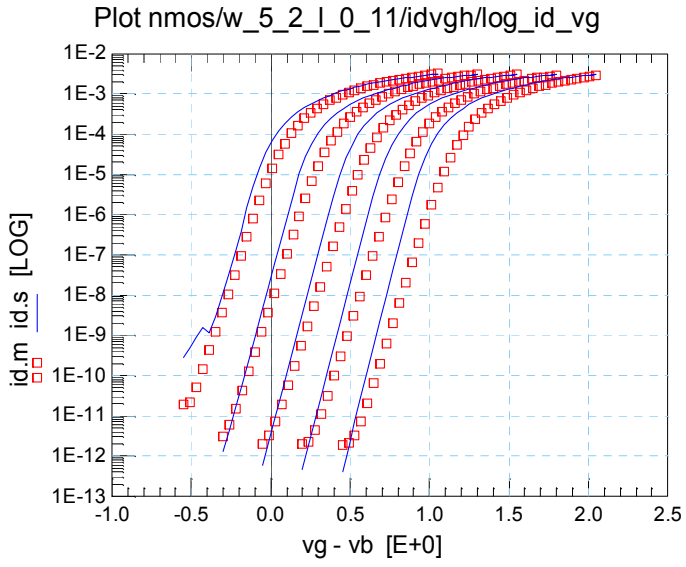
PO
A
E

X
Y



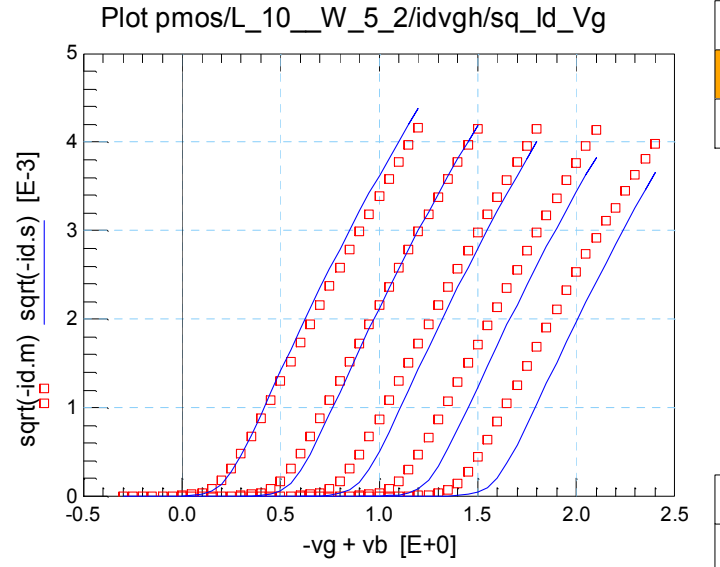
PO
A
E

X
Y



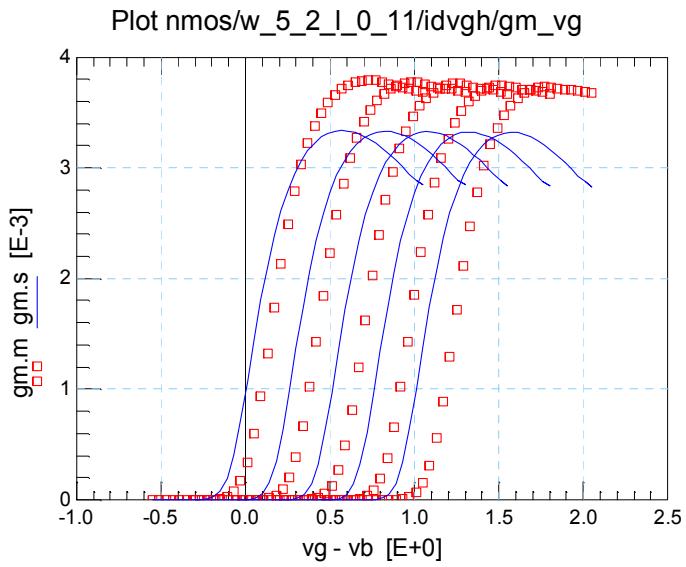
PO
A
E

X
Y



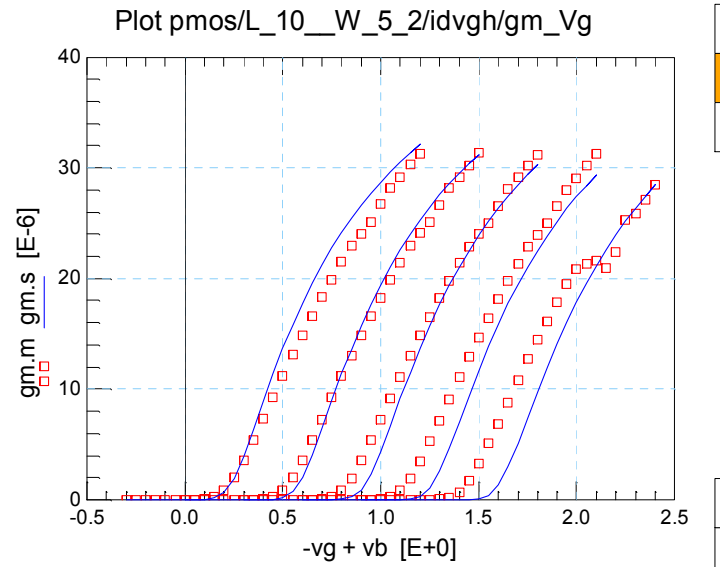
PO
A
E

X
Y



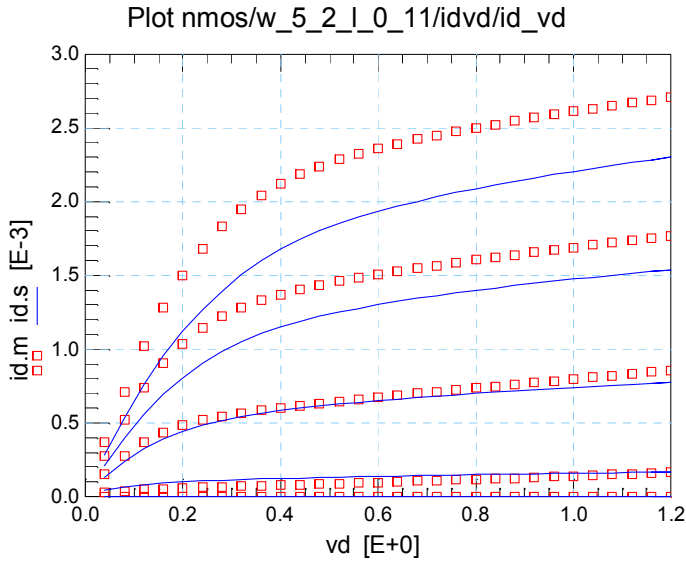
PO
A
E

X
Y



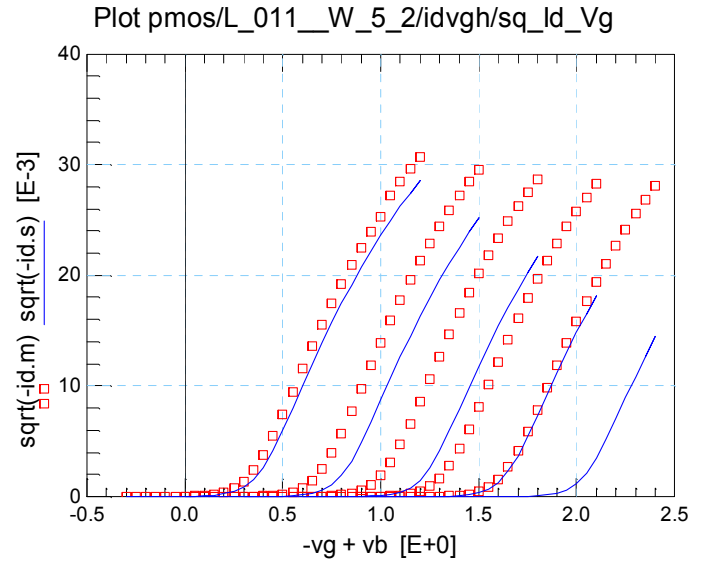
PO
A
E

X
Y



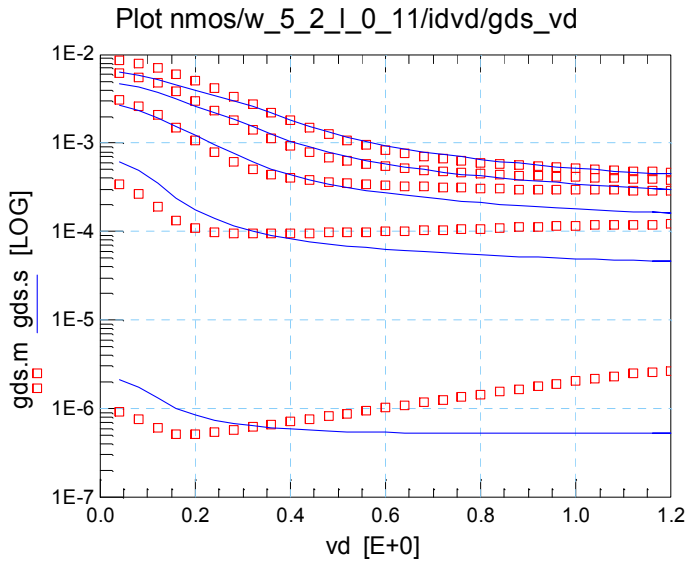
PO
A
E

X
Y



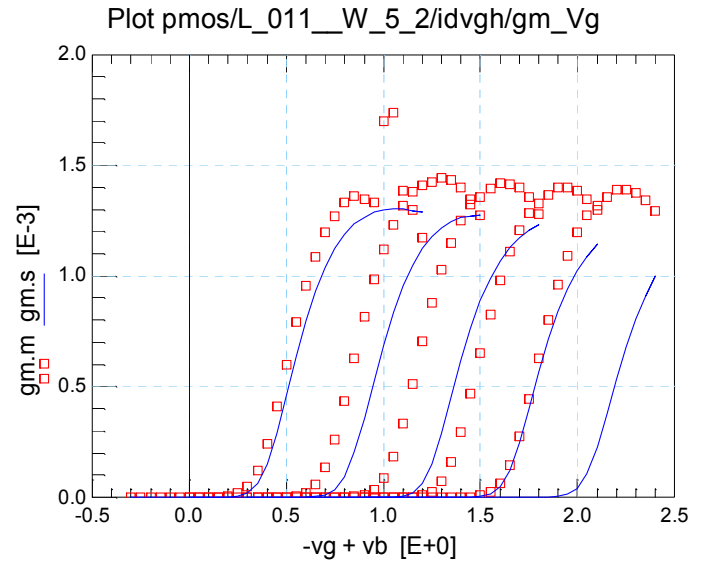
PO
A
E

X
Y



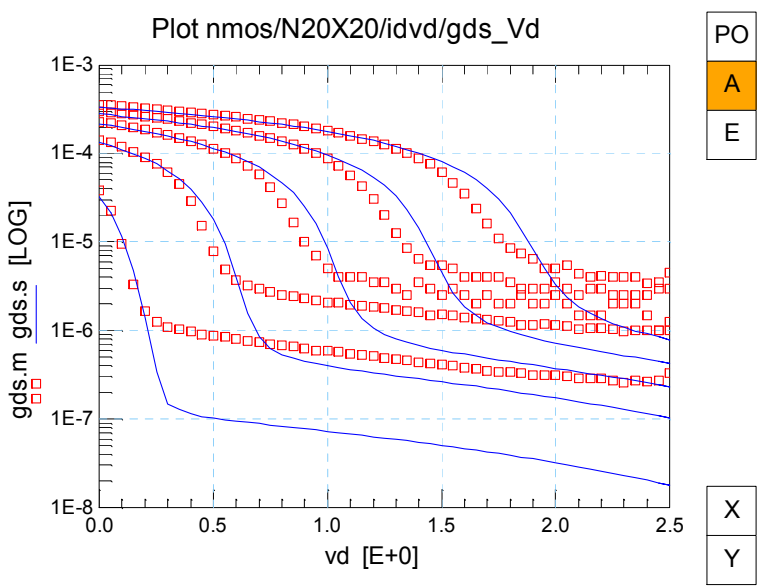
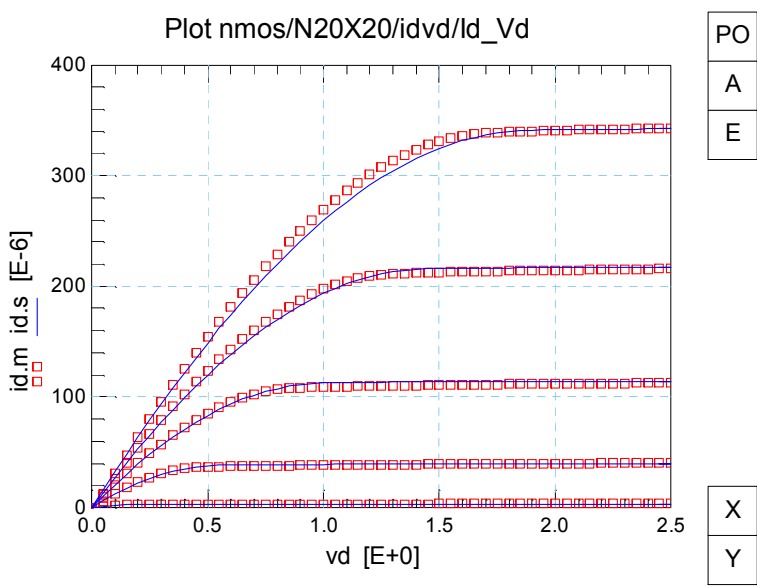
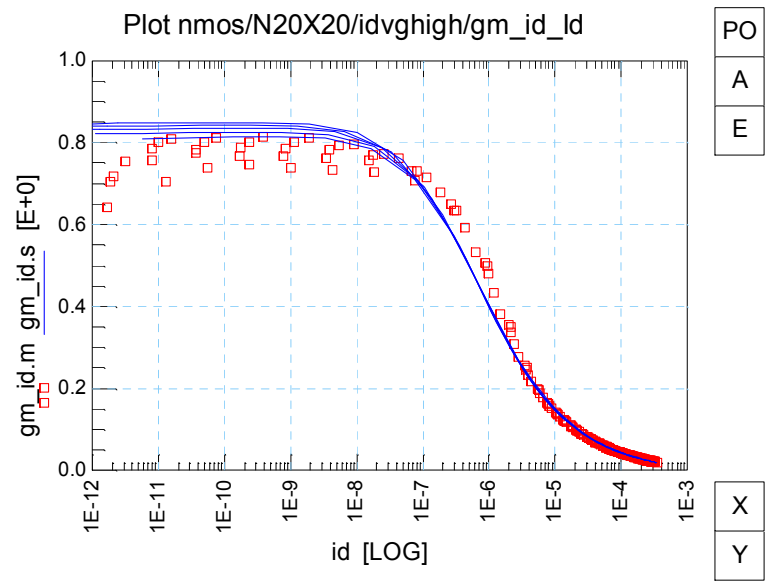
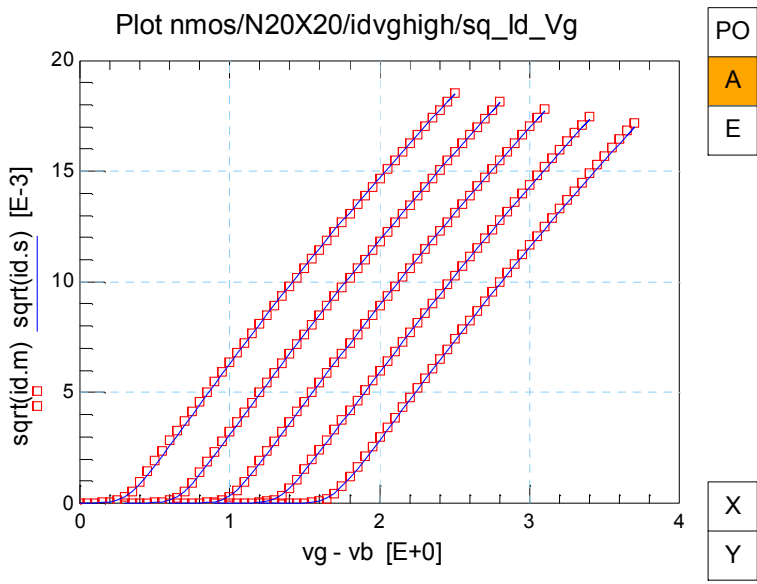
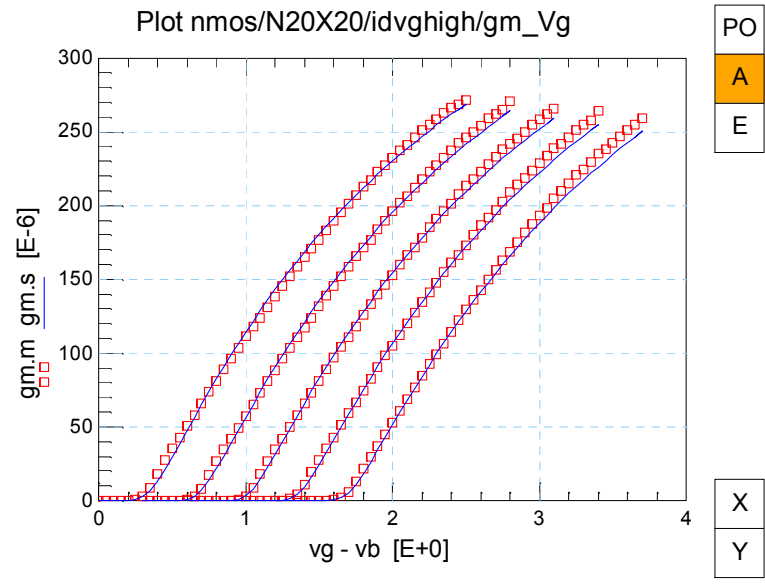
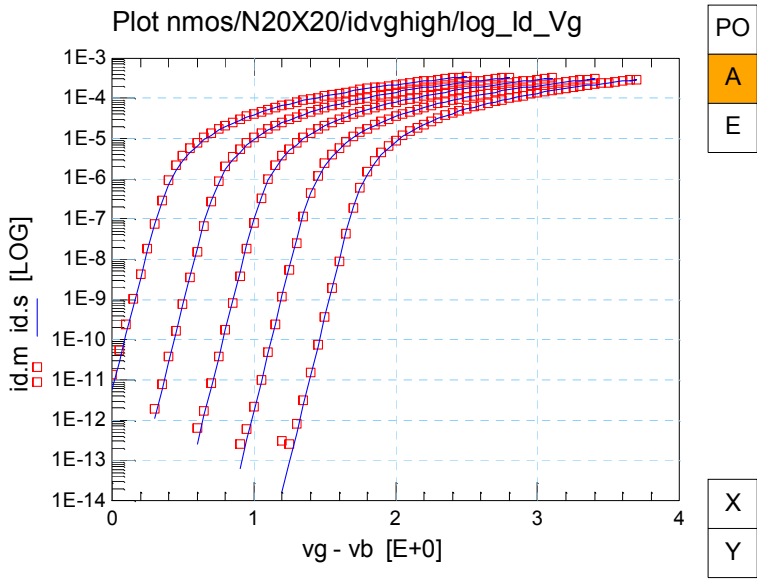
PO
A
E

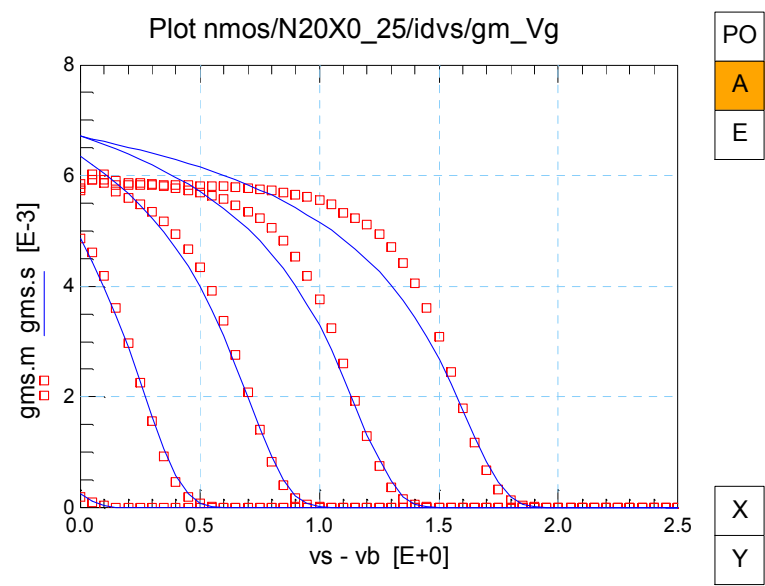
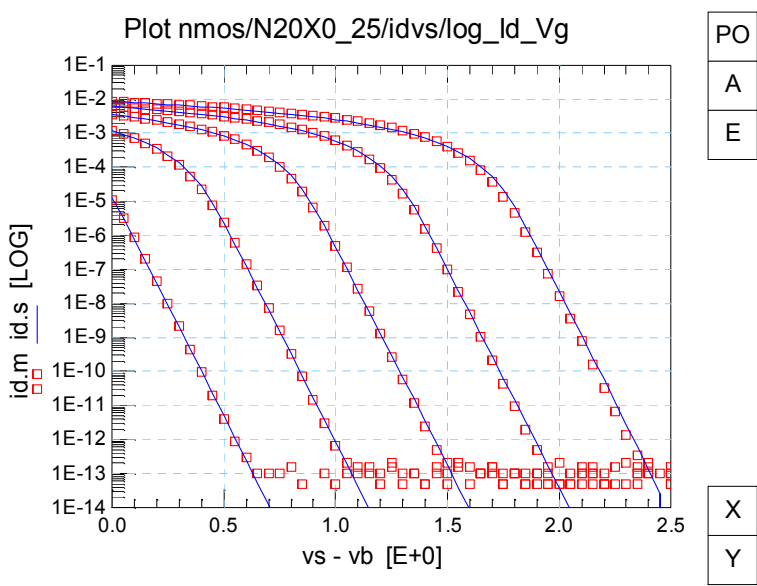
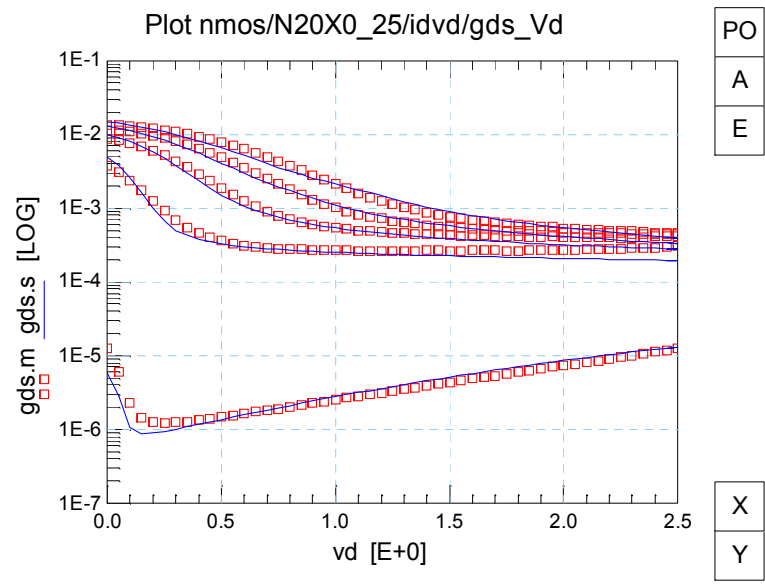
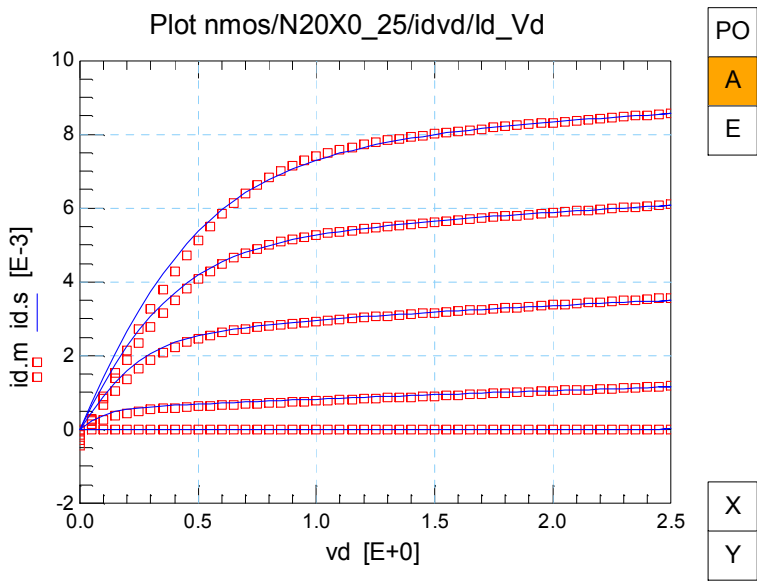
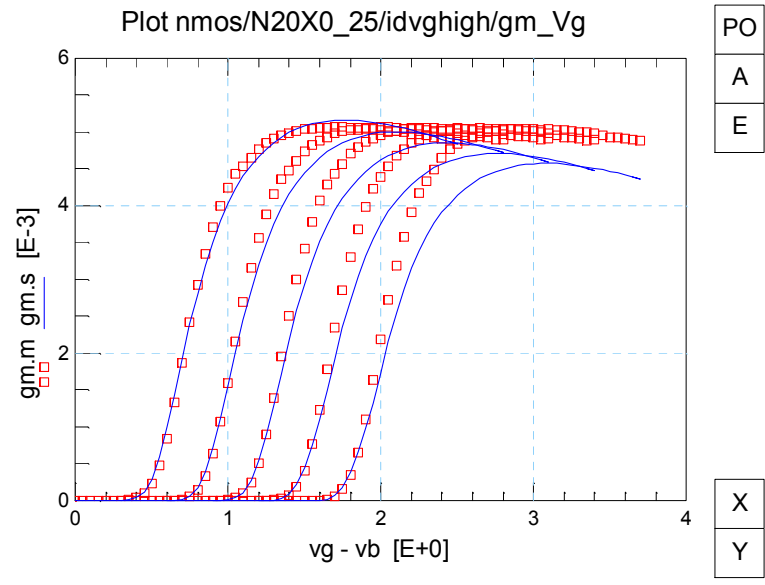
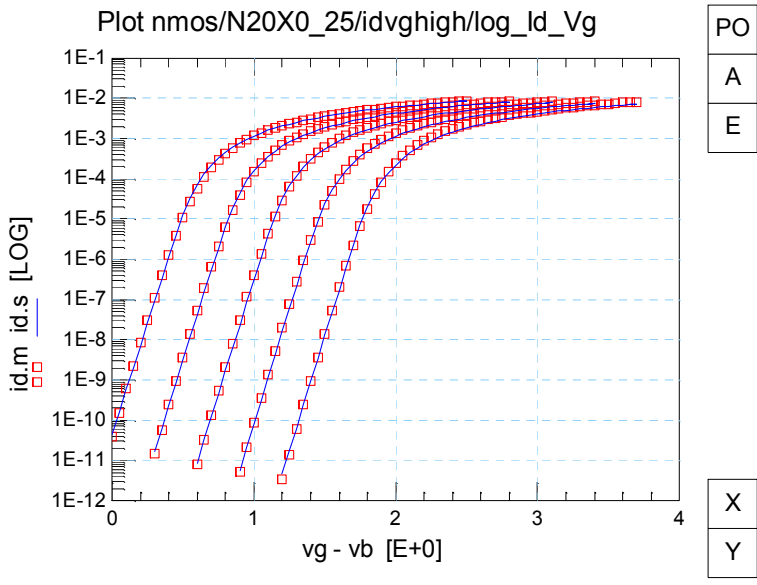
X
Y

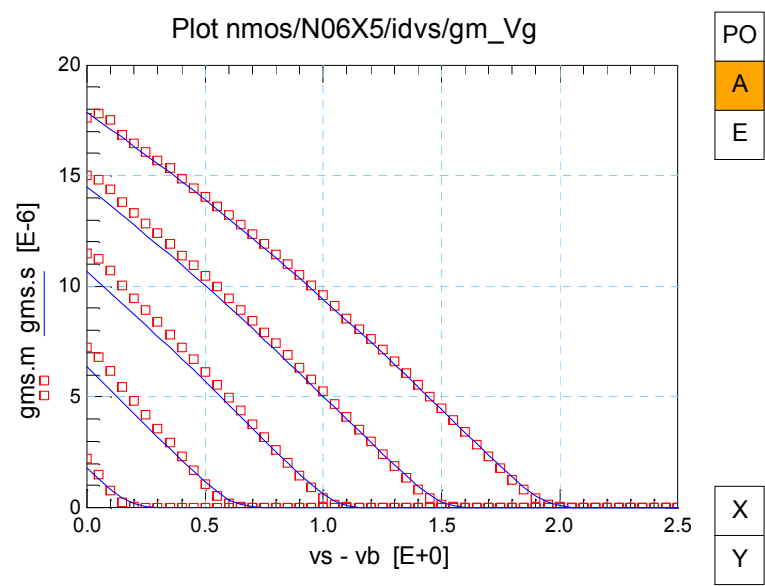
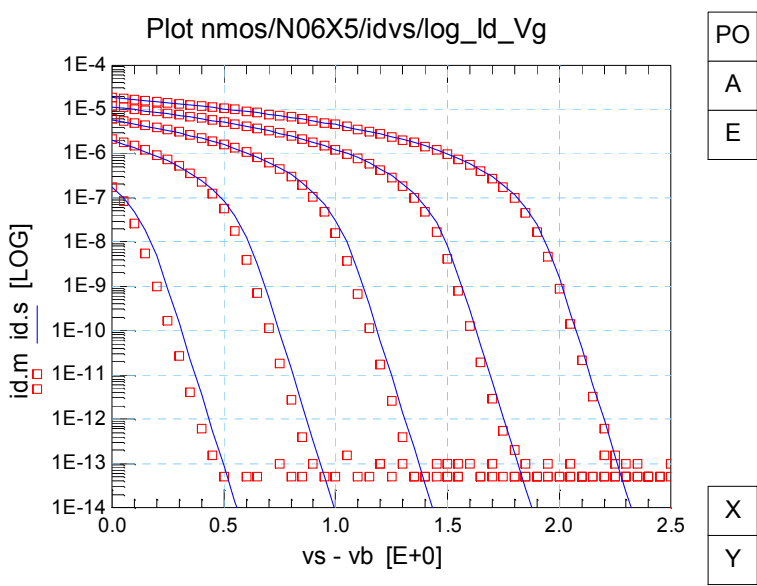
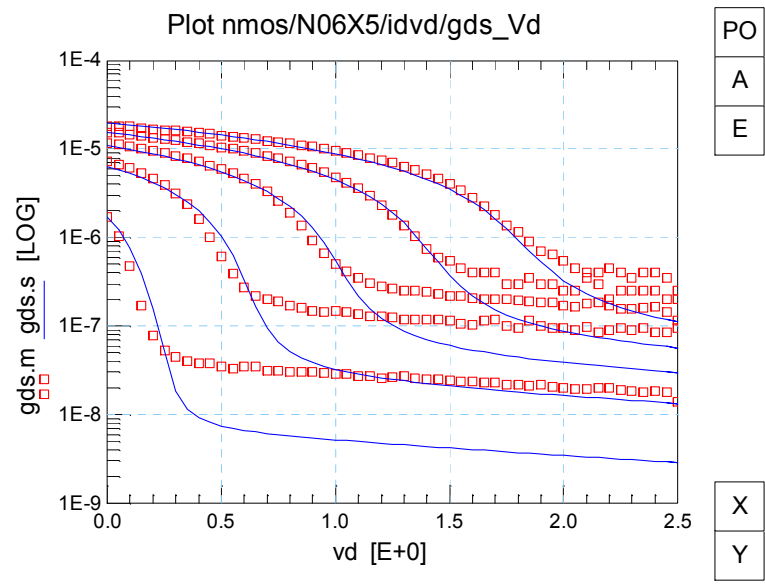
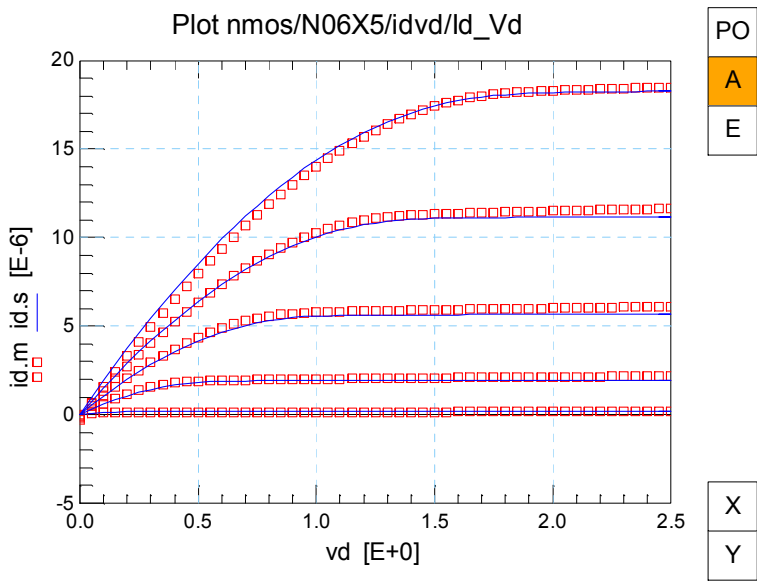
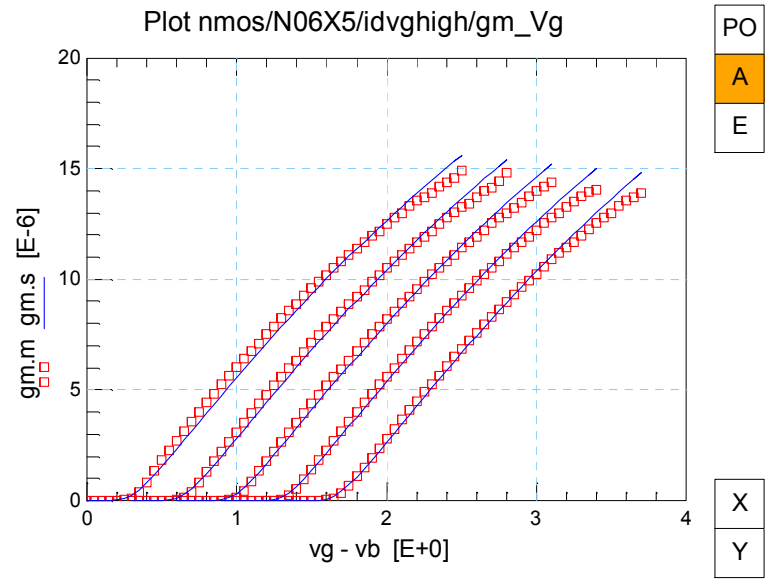
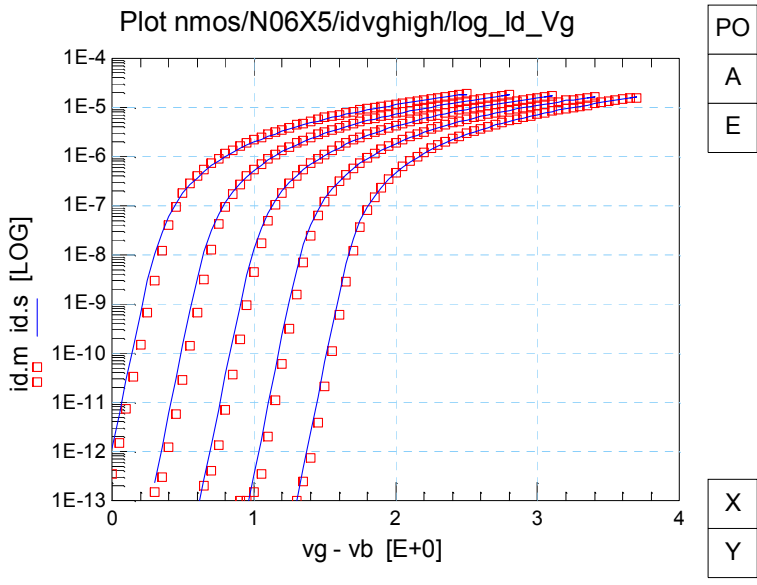


PO
A
E

X
Y







Σίγουρα τα αποτελέσματα που δίνει ο optimizer του ICCAP δεν είναι τα καλύτερα δυνατά, όμως δίνει πολύ καλές προσεγγίσεις στις τιμές των παραμέτρων του EKV3 μοντέλου, δίνοντάς μας έτσι την ευκαιρία να υπάρχει στην διάθεσή μας ένα ενδεικτικό σετ παραμέτρων, έχοντας μετρήσεις οποιασδήποτε CMOS τεχνολογίας.

5. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την διπλωματική αυτή είναι πολλά, καθώς πιστοποιήσαμε την εγκυρότητα του EKV3 μοντέλου σε διαφορετικές γενιές CMOS τεχνολογιών. Οι προσομοιώσεις των πειραματικών δεδομένων με ένα συνεχές μοντέλο, όπως είναι το EKV3 απέδειξαν ότι είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο, καλύπτοντας μια πληθώρα φαινομένων που διέπουν τα τρανζίστορ, σε όλες τις περιοχές λειτουργίας τους και σε όλες τις διαθέσιμες γεωμετρίες, τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS.

Τα συμπεράσματα, από την εκτέλεση των βελτιστοποιήσεων, είναι εξίσου σημαντικά. Κι αυτό γιατί μπορούμε κάλλιστα να έχουμε ένα ενδεικτικό σετ παραμέτρων, από τη στιγμή που υπάρχουν διαθέσιμες οι μετρήσεις οποιασδήποτε CMOS τεχνολογίας. Οι βελτιστοποιήσεις αναφέρονται στις βασικότερες παραμέτρους και όχι στο σύνολο των παραμέτρων του EKV3 μοντέλου.

Φυσικά, το σύστημα αυτόματης εξαγωγής παραμέτρων επιδέχεται ακόμα περισσότερης βελτίωσης για απόδοση σωστότερων τιμών των παραμέτρων σε όλες τις γεωμετρίες ενώ επιδέχεται ακόμα περαιτέρω ανάπτυξης για την εξαγωγή και των υπολοίπων παραμέτρων του EKV3 μοντέλου.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [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. Iñíguez, 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 “EKV3 model documentation”, 2007
- [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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 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	
THC	0	

I.2.7 Mobility Length and Width Dependence

Parameter Name	Default Value	Short Description
LA	1.0	
LB	1.0	
KA	0.0	
KB	0.0	
WKP1	1.0E-6	
WKP2	0.0	
WKP3	1.0	

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	
LVT	1.0	
WVT	1.0	
AGAM	0.0	
LGAM	1.0	
WGAM	1.0	
NFVTA	0.0	
NFVTB	10000.0	

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	
DELTA	2.0	
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	

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	
PDITS	0.0	
PDITSL	0.0	
PDITSD	1.0	
DDITS	0.3	

I.2.16 Impact Ionization Current

Parameter Name	Default Value	Short Description
IBA	000.0E+06	
IBB	300.0E+06	
IBN	1.0	

I.2.17 Gate Current

Parameter Name	Default Value	Short Description
XB	3.1	
EB	29.0E+09	
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	
BGIDL	2.3E+09	
CGIDL	0.5	
DGIDL	0.8	

I.2.19 Edge Conductance Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
WEDGE	0.0	
DGAMMAEDGE	0.0	
DPHIEDGE	0.0	

I.2.20 STI Stress Effect

Parameter Name	Default Value	Short Description
SAREF	0.0	
SBREF	0.0	
WLOD	0.0	
KKP	0.0	
LKKP	0.0	
WKKP	0.0	
PKKP	0.0	
TKKP	0.0	
LLODKKP	1.0	
WLODKKP	1.0	
KVTO	0.0	
LKVTO	0.0	
WKVTO	0.0	
PKVTO	0.0	
LLODKVTO	1.0	
WLODKVTO	1.0	

I.2.21 Flicker Noise

Parameter Name	Default Value	Short Description
KF	0.0	
AF	1.0	
EF	2.0	
KGFN	0.0	

I.2.22 Length Scaling Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
LQWR	0.0	
LNWR	0.0	
LWR	0.0	
LDPHIEDGE	0.0	

I.2.23 Width Scaling Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
WQLR	0.0	
WNLR	0.0	
WLR	0.0	
WUCRIT	0.0	
WLAMBDA	0.0	
WETAD	0.0	
WE0	0.0	
WE1	0.0	
WRLX	0.0	
WUCEX	0.0	
WDPHIEDGE	0.0	

I.2.24 Short and Narrow Channel Fine Tuning Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
WLDPHIEDGE	0.0	
WLDGAMMAEDGE	0.0	

I.2.25 Temperature Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
TETA	-0.9E-3	

TLAMBDA	0.0	
TCV	600.0E-6	
BEX	-1.5	
UCEX	1.5	
TE0EX	0.5	
TE1EX	0.5	
IBBT	800.0E-6	

I.2.26 Geometry Dependencies of Temperature Parameters

Parameter Name	Default Value	Short Description
TCVL	0.0	
TCVW	0.0	
TCVWL	0.0	

I.3 Extrinsic Part of the Model

I.3.1 Overlap Capacitances

Parameter Name	Default Value	Short Description
GAMMAOV	1.6	
GAMMAGOV	10.0	
VFBOV	0.0	
LOV	20.0E-9	
VOV	1.0	
CGSO	0.0	
CGDO	0.0	
CGBO	0.0	

I.3.2 Fringing Capacitances

Parameter Name	Default Value	Short Description
KJF	0.0	
CJF	0.0	
VFR	0.0	
DFR	1.0E-3	

I.3.3 Series Resistances

Typical Spice Model

Parameter Name	Default Value	Short Description
HDIF	0.0e-6	
RSH	0.0	
LDIF	0.0	
RS	0.0	
RD	0.0	

Non-Geometrical Approach

Parameter Name	Default Value	Short Description
RLX	-1.0	
RSX	-1.0	
RDX	-1.0	
RGX	-1.0	
RBX	-1.0	

I.3.4 Temperature Scaling of Extrinsic Resistors

Parameter Name	Default Value	Short Description
TR	0.0	
TR2	0.0	

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

Parameter Name	Default Value	Short Description
ND	1.0	
JS	0.0E-09	
JSW	0.0E-12	
JSWG	0.0E-12	
MJ	0.900	
MJSW	0.700	
MJSWG	0.700	
PB	0.800	
PBSW	0.600	
PBSWG	0.600	
CJ	0.0E-06	
CJSW	0.0E-09	
CJSWG	0.0E-09	
GMIN	0.0	
XJBV	0.0	
BV	10.0	
XTI	3.0	
TCJ	0.0	

TCJSW	0.0	
TCJSWG	0.0	
TPB	0.0	
TPBSW	0.0	
TPBSWG	0.0	
JTS	0.0E-09	
JTSW	0.0E-12	
JTSWG	0.0E-12	
XTS	0.0	
XTSW	0.0	
XTSWG	0.0	
NJTS	1.0	
NJTSSW	1.0	
NJTSSWG	1.0	
VT	0.0	
VTSSW	0.0	
VTSSWG	0.0	
TNJTS	0.0	
TNJTSSW	0.0	
TNJTSSWG	0.0	

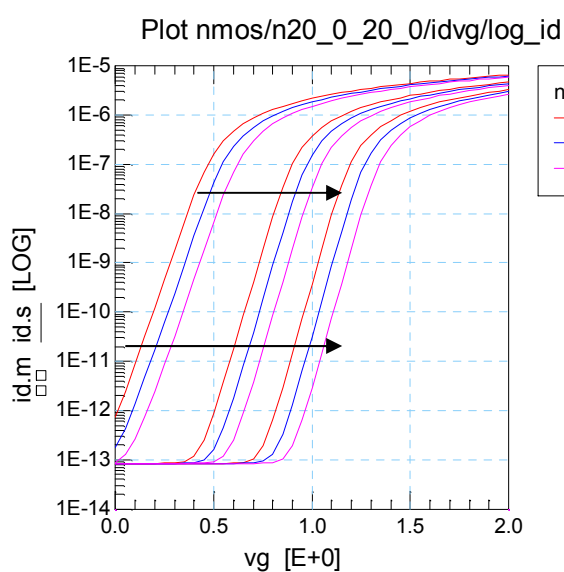
I.3.6 Gate and Substrate Resistances

Parameter Name	Default Value	Short Description
RGSH	3.0	
GC	1	
RDSBSH	1.0E+3	
RBWSH	3.0E-3	
RBN	0.0	
RSBWSH	1.0E-3	
RSBN	0.0	
RDBWSH	1.0E-3	
RDBN	0.0	
RINGTYPE	1.0	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

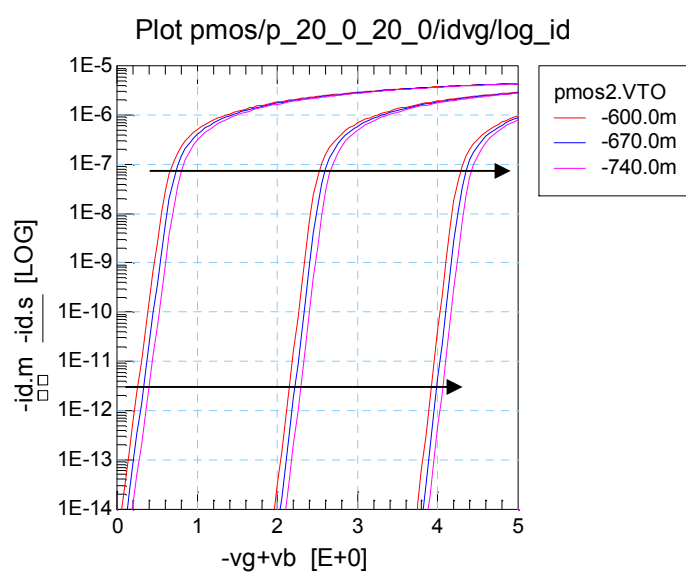
Η τεχνολογία στην οποία έγινε προσομοίωση είναι η 1 μ m. Σε γραφικές παραστάσεις φαίνονται οι επιπτώσεις που έχουν οι αλλαγές των τιμών των παραμέτρων του EKV3 μοντέλου στην λειτουργία του τόσο σε NMOS (δεξιά) όσο και σε PMOS (αριστερά). Οι γραφικές παραστάσεις που δείχνουμε είναι των γεωμετριών, οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από την αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.

Για την παράμετρο VTO :



PO
A
E

X
Y

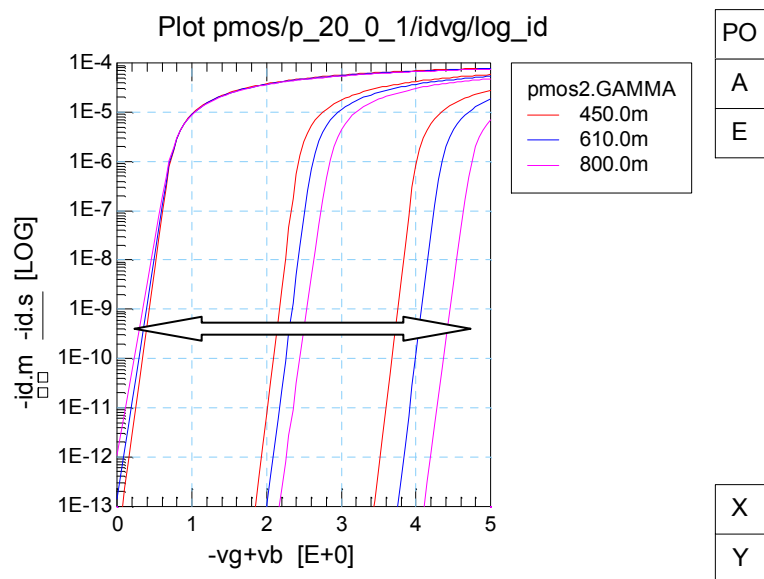
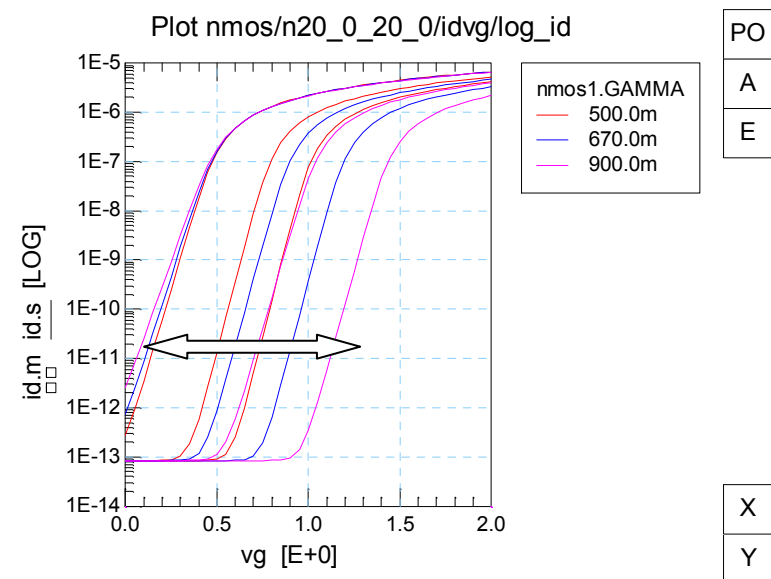


PO
A
E

X
Y

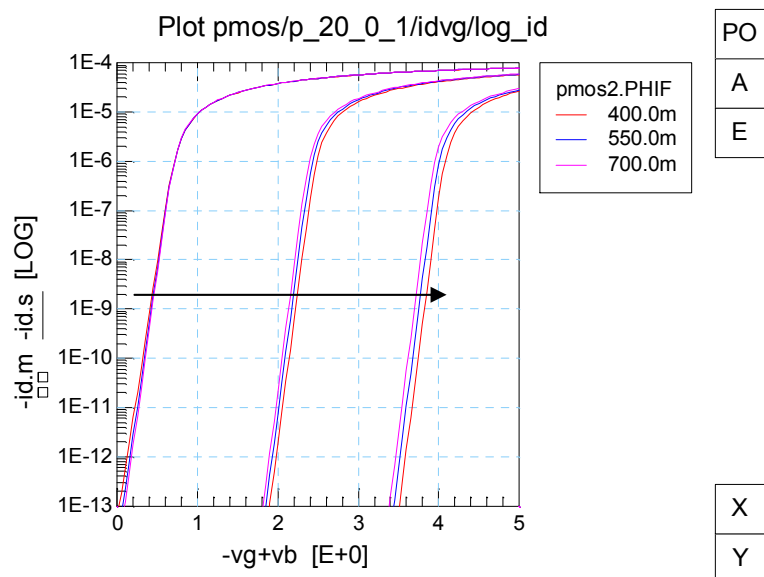
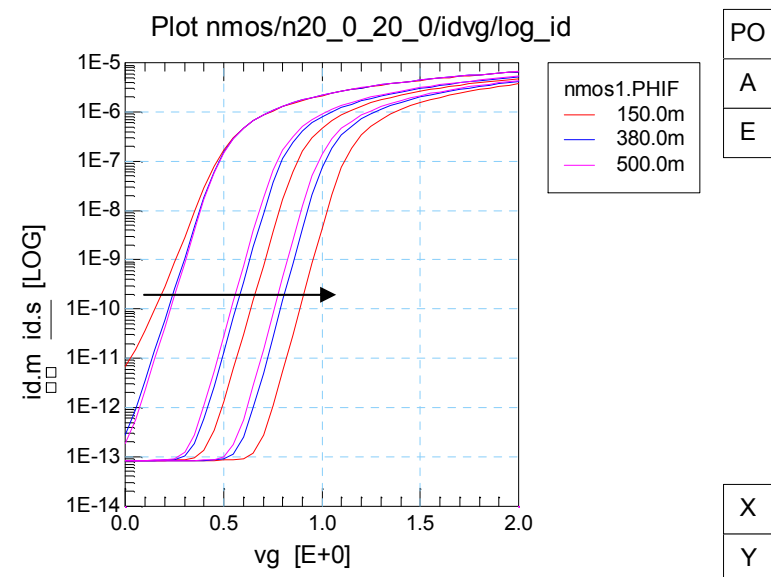
Παρατηρούμε πως όσο αυξάνει η τιμή της παραμέτρου V_{TO} , τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, η προσομοίωση μεταφέρεται προς τα δεξιά στις γραφικές i_{dvg} .

Για την παράμετρο GAMMA :



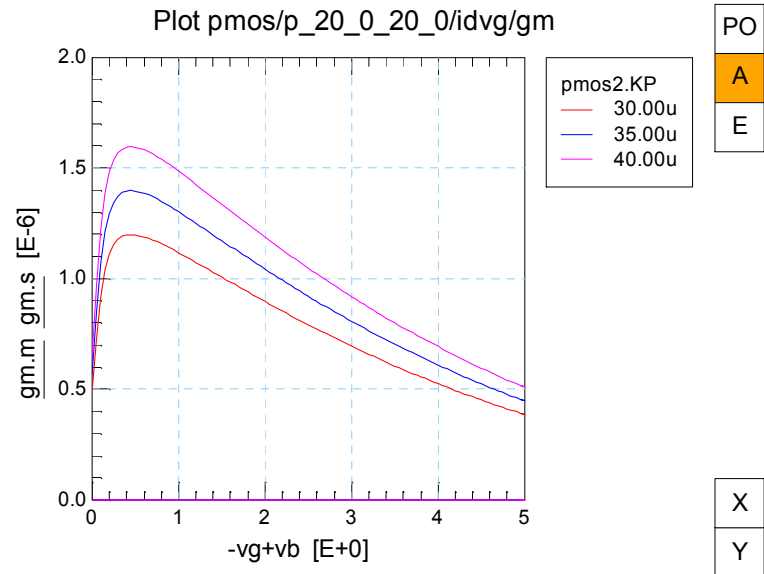
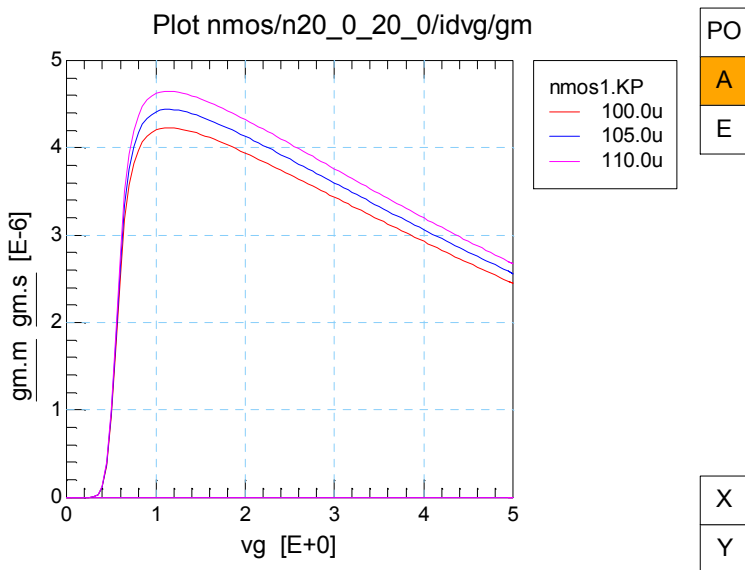
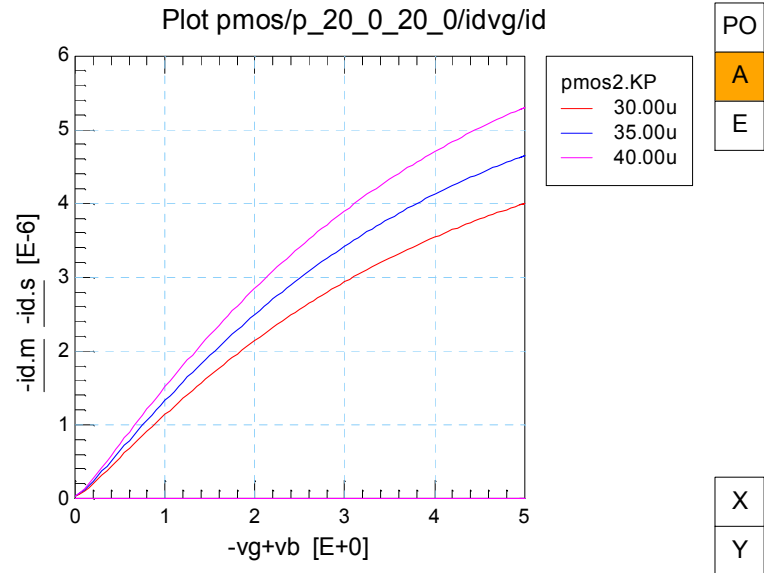
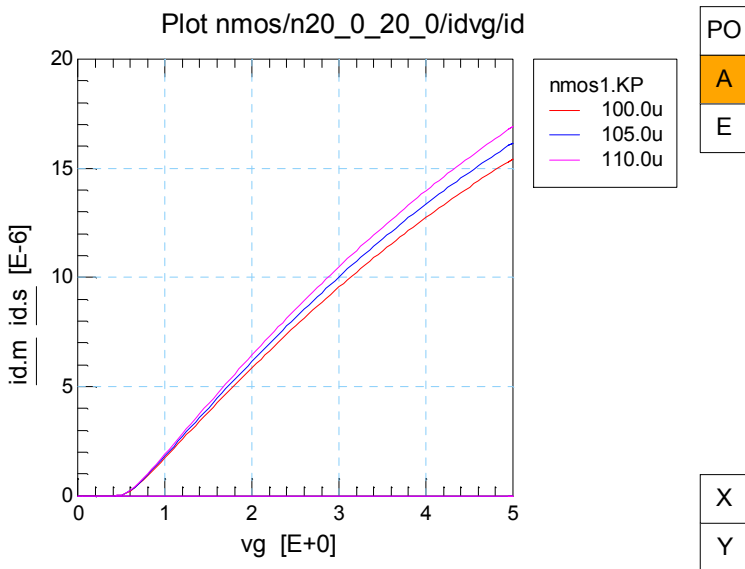
Η αύξηση της τιμής της παραμέτρου GAMMA έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μετατόπιση αριστερά και δεξιά των προσομοιώσεων.

Για την παράμετρο PHIF :



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

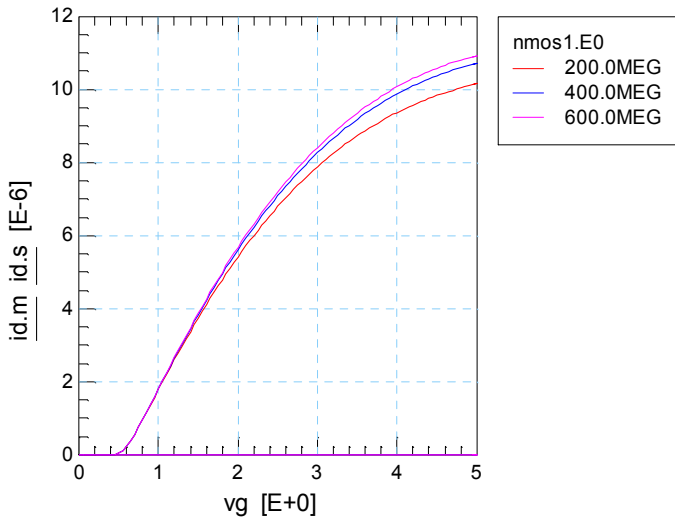
Για την παράμετρο KP :



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 vg.

Για τις παραμέτρους E0, E1, ETA :

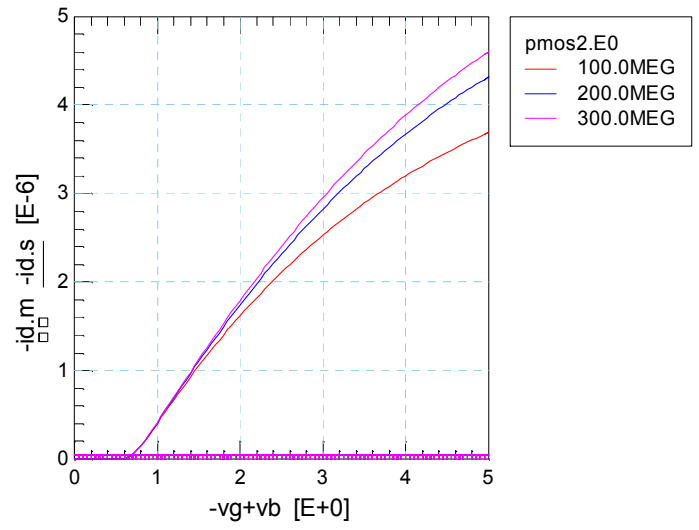
Plot nmos/n20_0_20_0/idvg/id



PO
A
E

X
Y

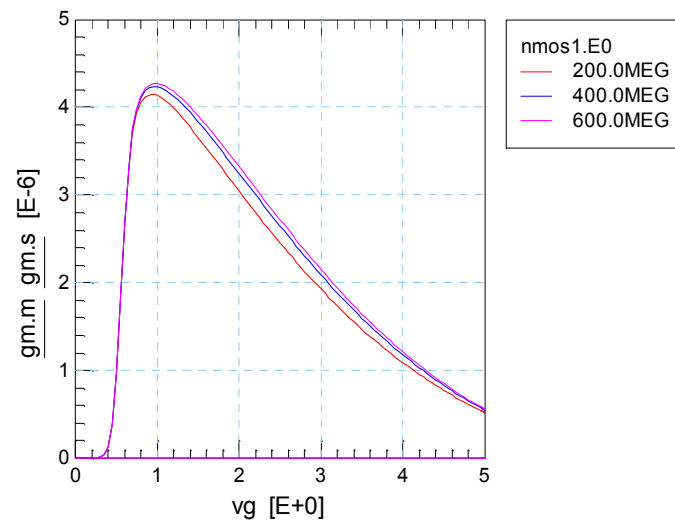
Plot pmos/p_20_0_20_0/idvg/id



PO
A
E

X
Y

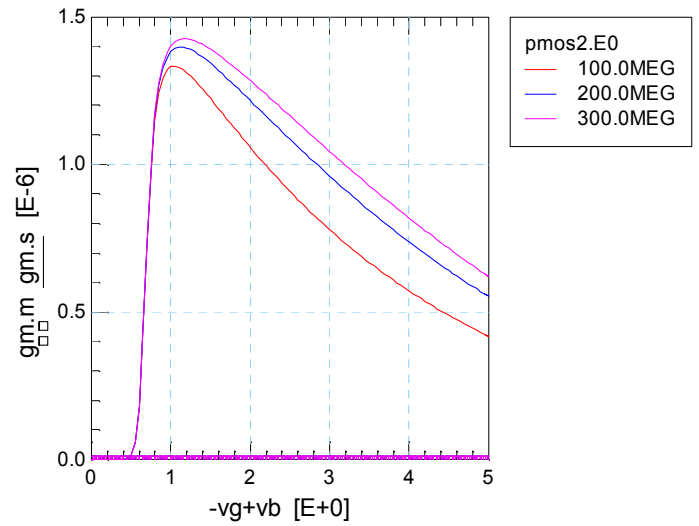
Plot nmos/n20_0_20_0/idvg/gm



PO
A
E

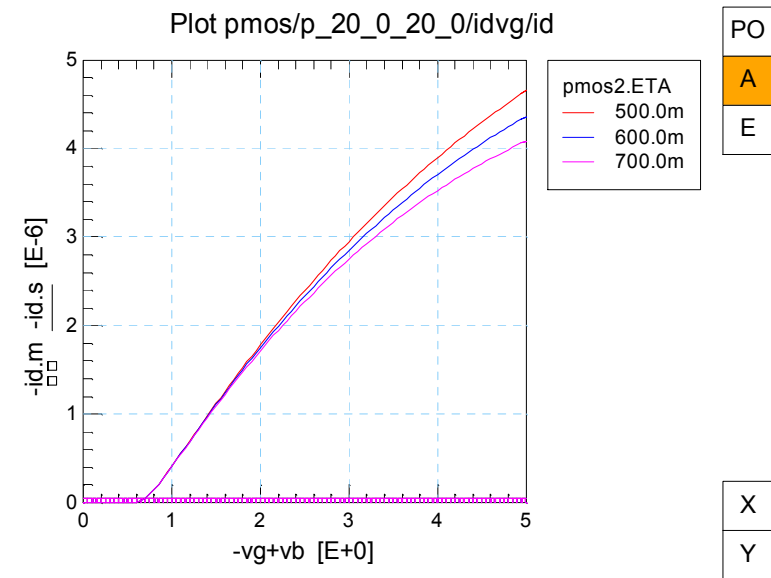
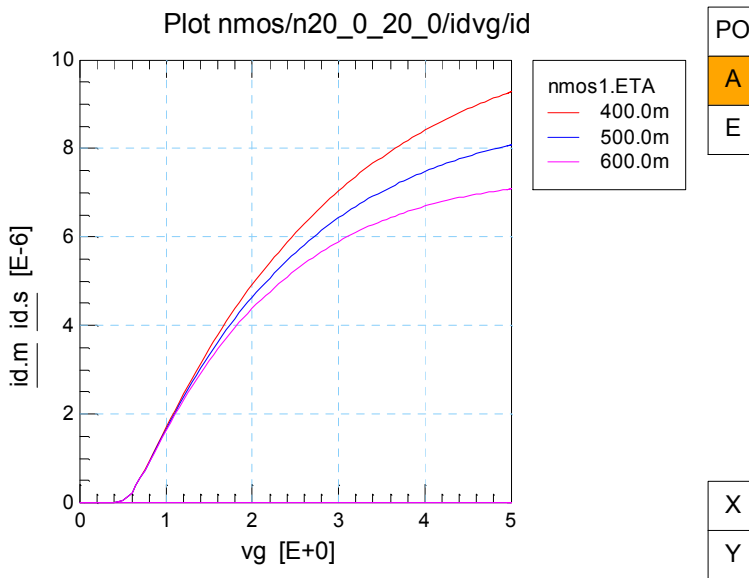
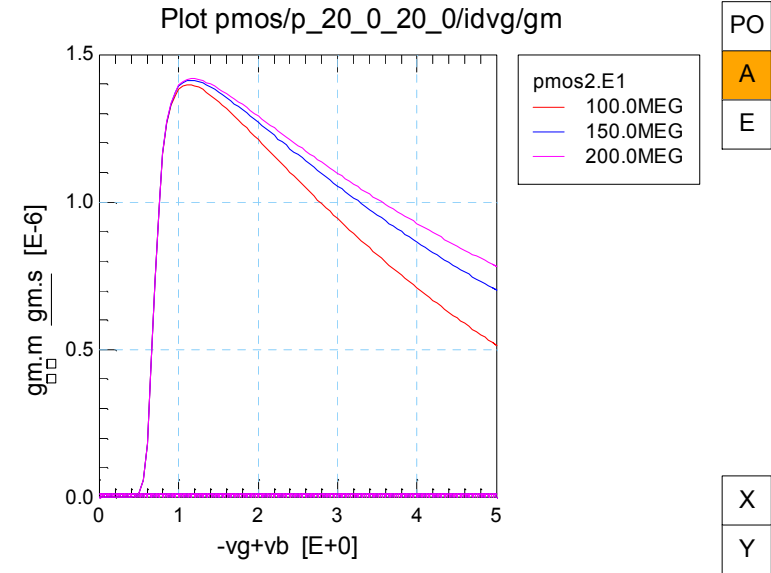
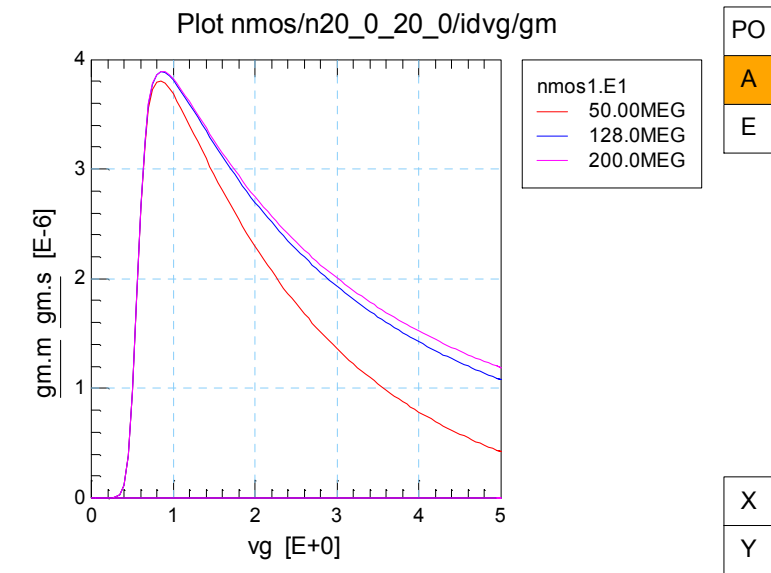
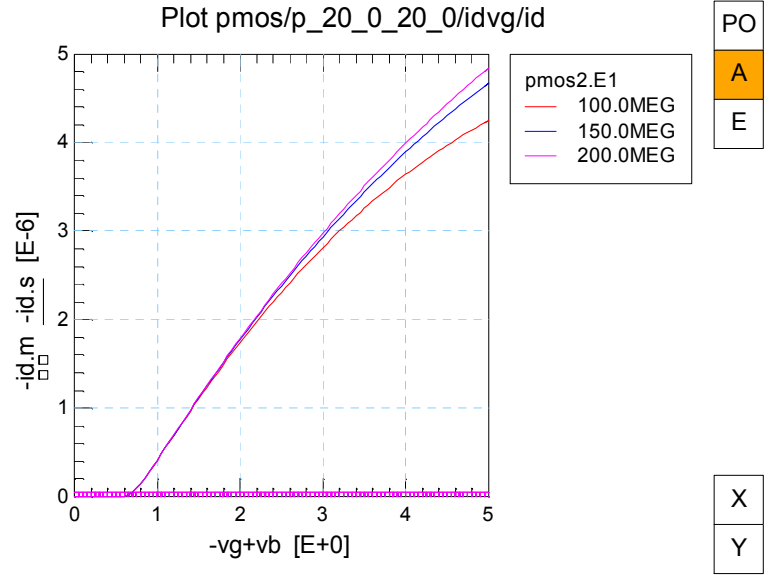
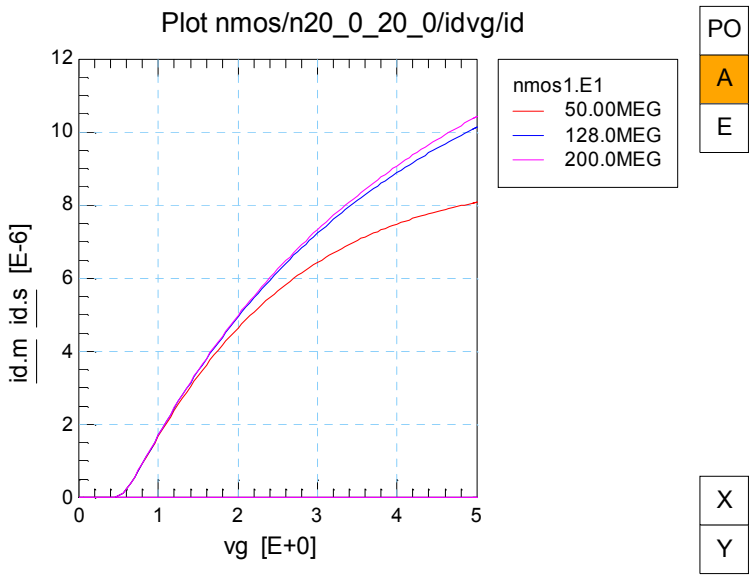
X
Y

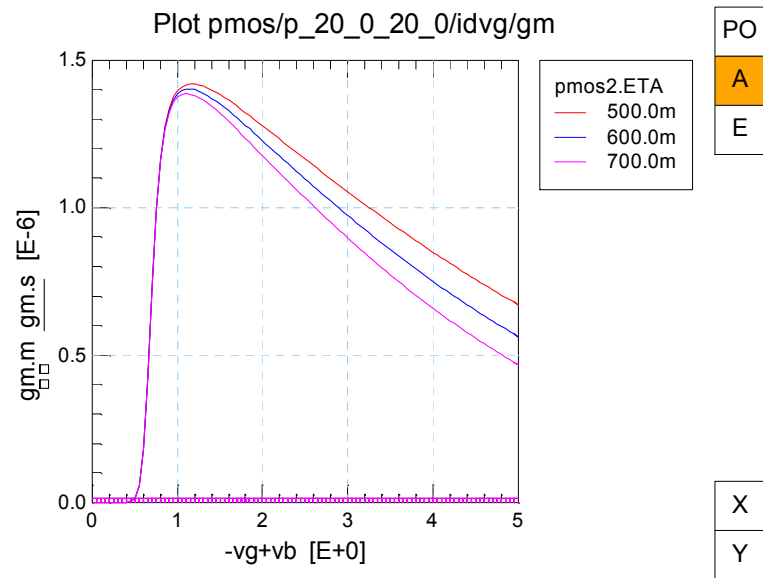
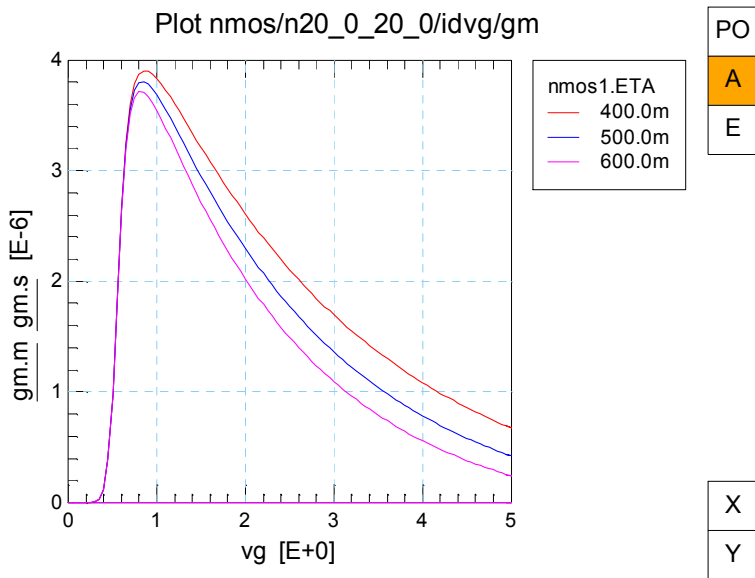
Plot pmos/p_20_0_20_0/idvg/gm



PO
A
E

X
Y

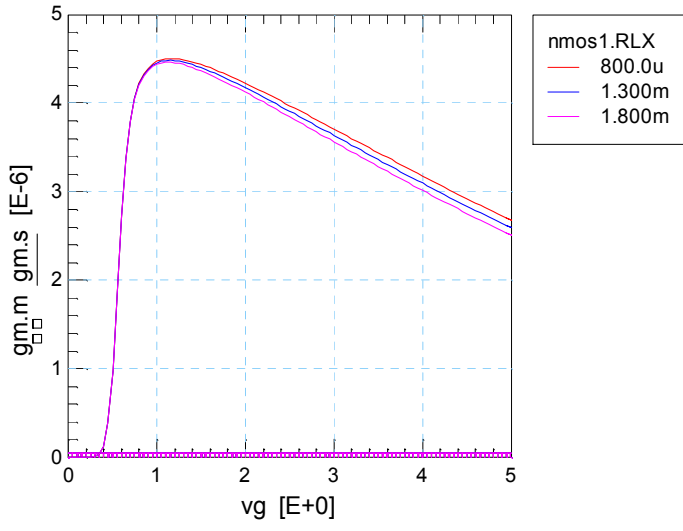




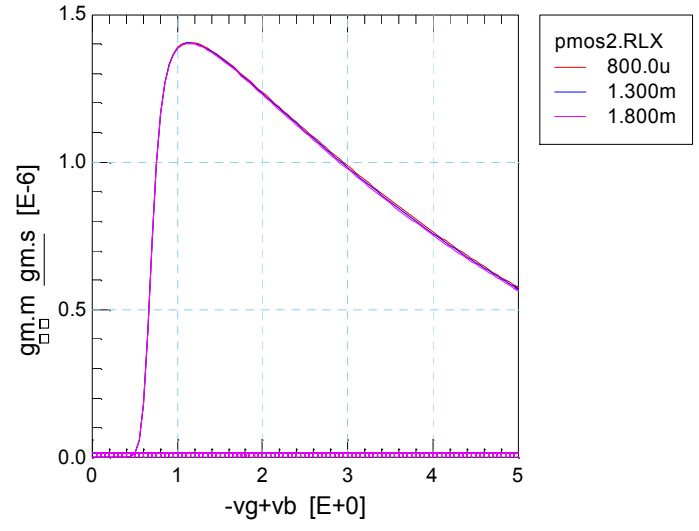
Όσο πιο πολύ αυξάνουν οι τιμές των παραμέτρων $E0$, $E1$, ETA , τόσο σε NMOS όσο και σε PMOS, αυξάνει η τιμή του ρεύματος κυρίως σε moderate και σε strong inversion. Η παράμετρος $E0$ επηρεάζει κυρίως σε ισχυρή αναστροφή και παρατηρούμε ότι μικρές διακυμάνσεις στις τιμές της επιφέρουν πολύ μικρές αυξήσεις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

Για τις παραμέτρους DL, RLX :

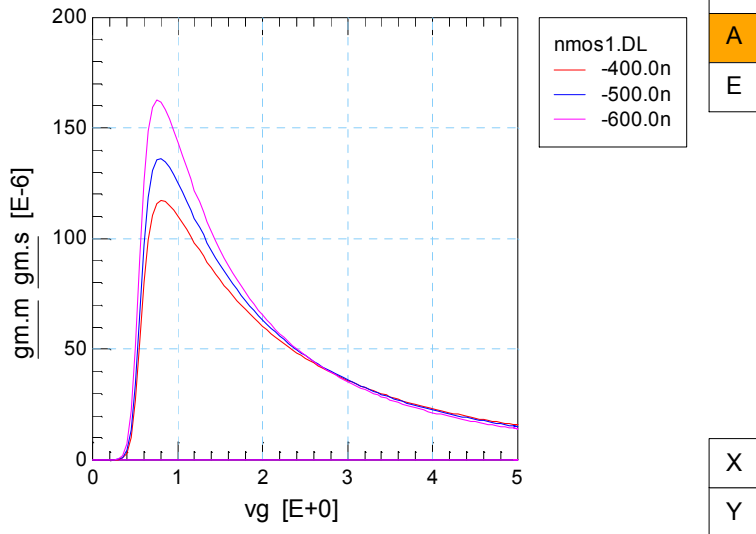
Plot nmos/n20_0_20_0/idvg/gm



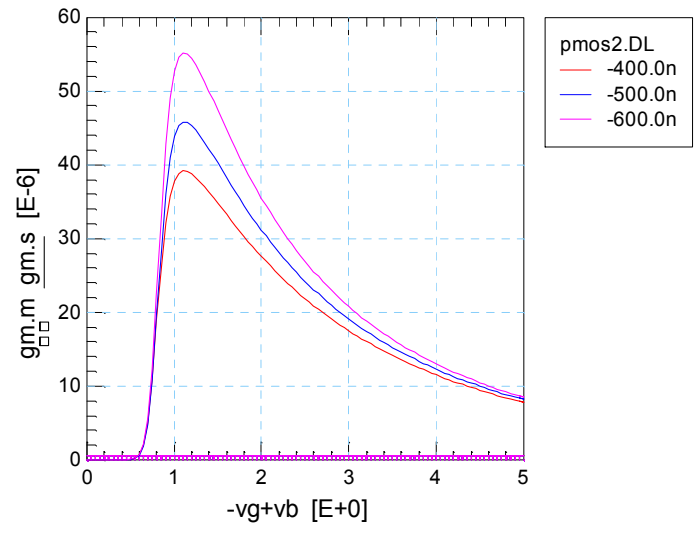
Plot pmos/p_20_0_20_0/idvg/gm

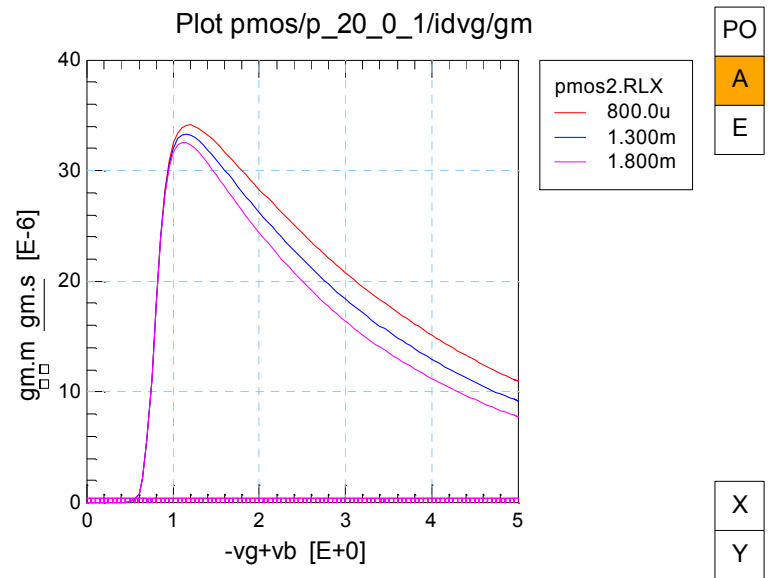
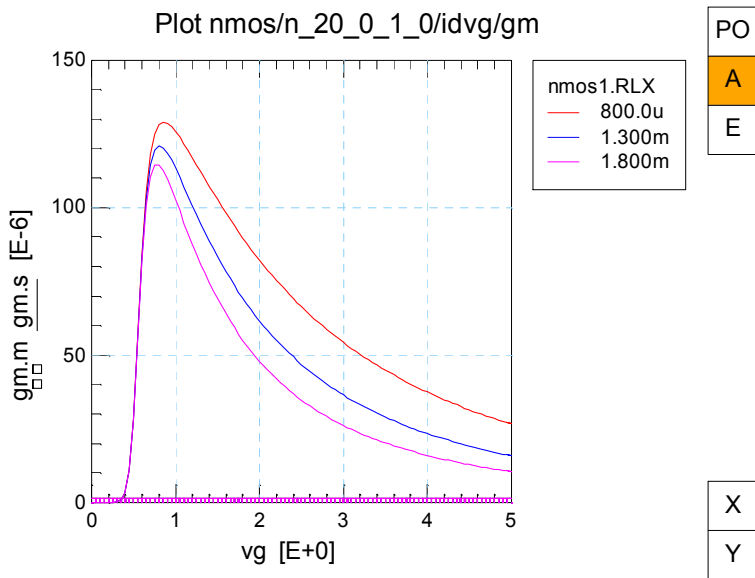


Plot nmos/n_20_0_1_0/idvg/gm



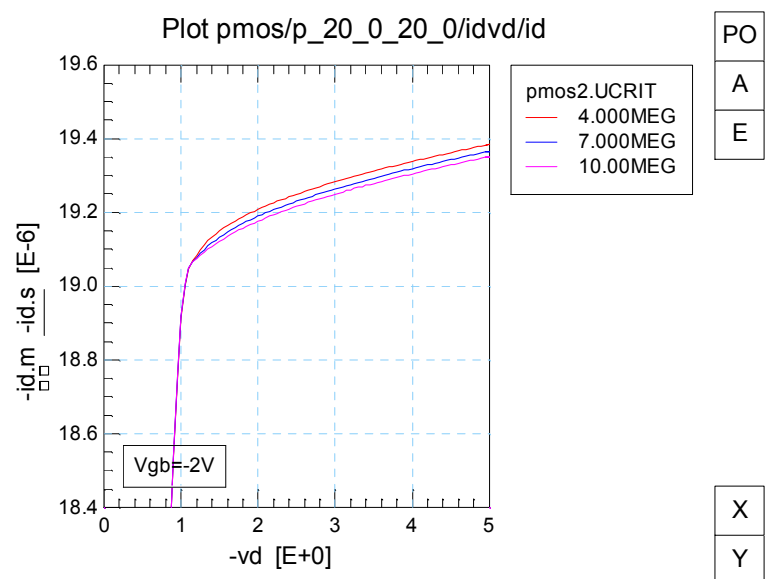
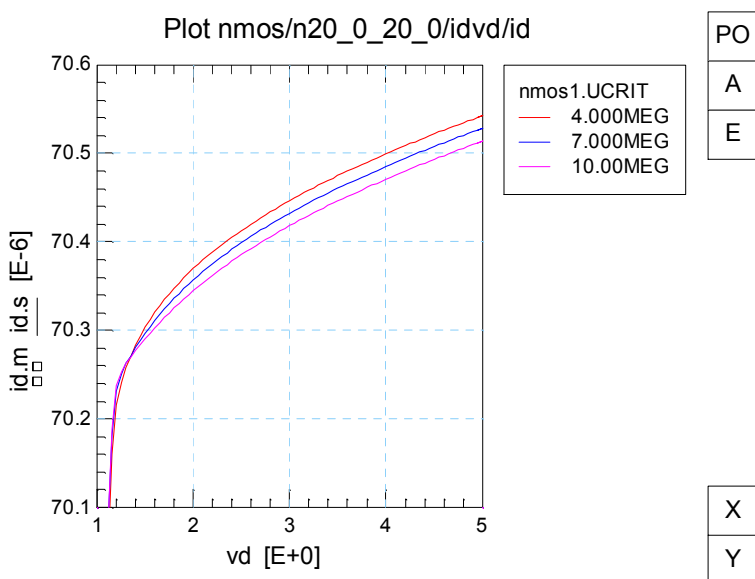
Plot pmos/p_20_0_1_0/idvg/gm

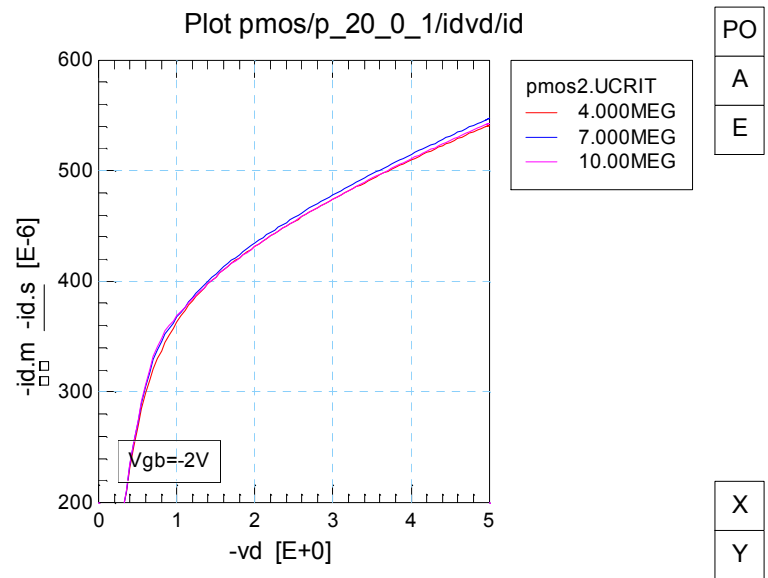
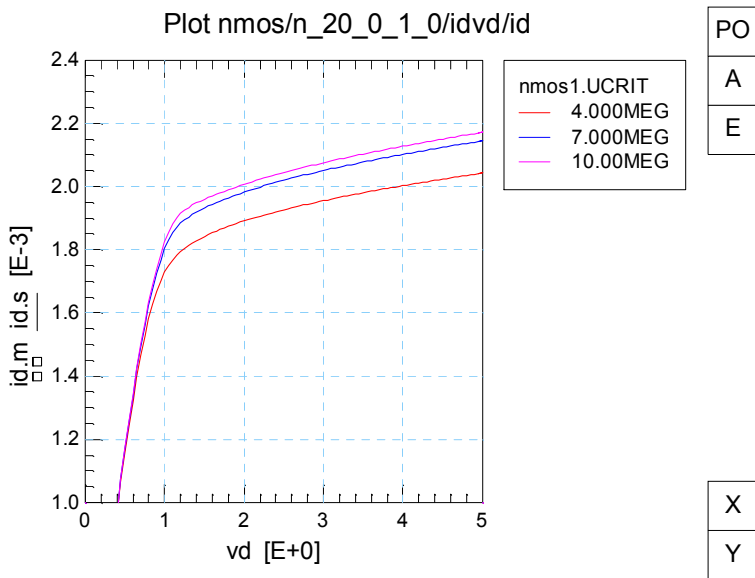




Παρατηρούμε ότι οι παράμετροι DL, RLX δεν επηρεάζουν καθόλου την wide/long γεωμετρία αλλά μόνο την wide/short μειώνοντας τις τιμές των διαγωγιμοτήτων, όταν οι τιμές των παραμέτρων αυτών αυξάνονται.

Για την παράμετρο UCRIT :





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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Extended validation of EKV3 compact mode for a 1um CMOS technology

Αρχικά πρέπει να παραθέσουμε τα setup που έγιναν για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τεχνολογία 1um. Αυτά σε NMOS και σε PMOS είναι :

Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_g που έγιναν είναι :

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

$$V_g = 0\text{V} - 5\text{V step } 50\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - 3\text{V step } 750\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_s που έγιναν είναι :

$$V_d = 5\text{V}$$

$$V_g = 400\text{mV} - 5\text{V step } 1150\text{mV}$$

$$V_s = -200\text{mV} - 4\text{V step } 42\text{mV}$$

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

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_d που έγιναν είναι :

$$V_d = 0\text{V} - 5\text{V step } 50\text{mV}$$

$$V_g = 400\text{mV} - 5\text{V step } 1150\text{mV}$$

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

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

Για τα τρανζίστορ τύπου P (PMOS)

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_g που έγιναν είναι :

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

$$V_g = 0\text{V} - -5\text{V step } 50\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - 3\text{V step } 750\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_s που έγιναν είναι :

$V_d = -5V$

$V_g = -400mV - -5V \text{ step } -1150mV$

$V_s = 200mV - -4V \text{ step } 40mV$

$V_b = 0V$

Το setup για τις μετρήσεις i_d - v_d που έγιναν είναι :

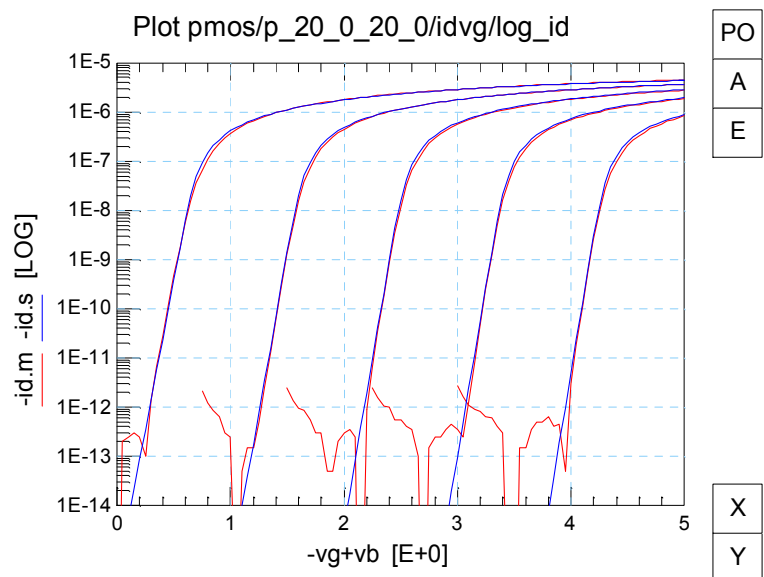
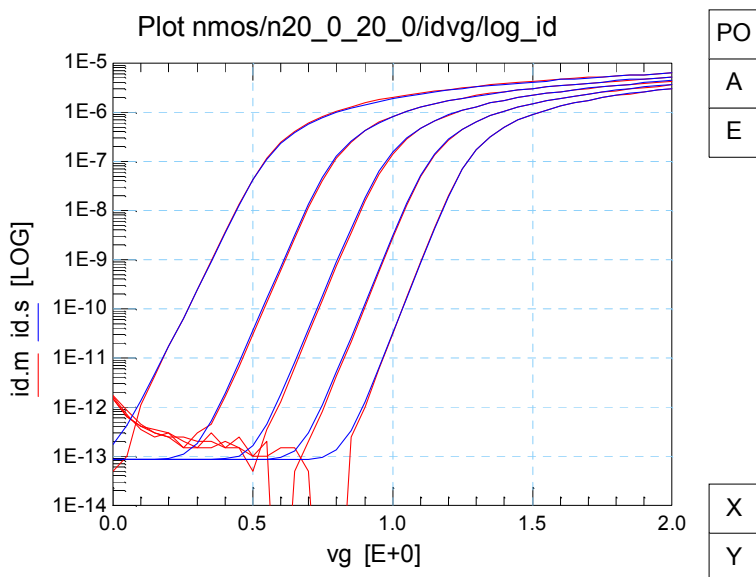
$V_d = 0V - -5V \text{ step } -50mV$

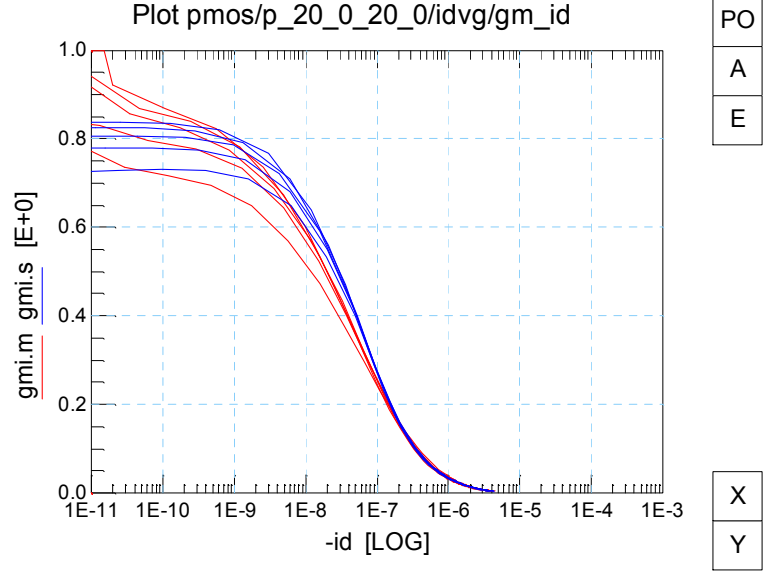
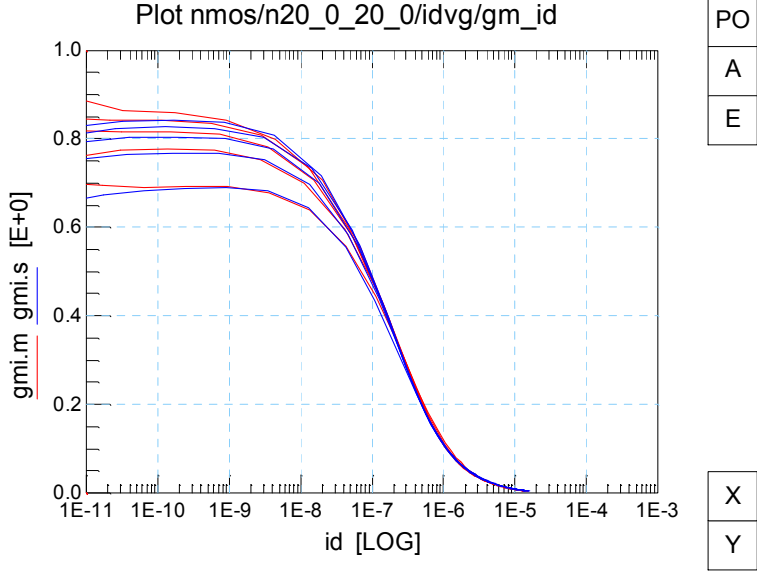
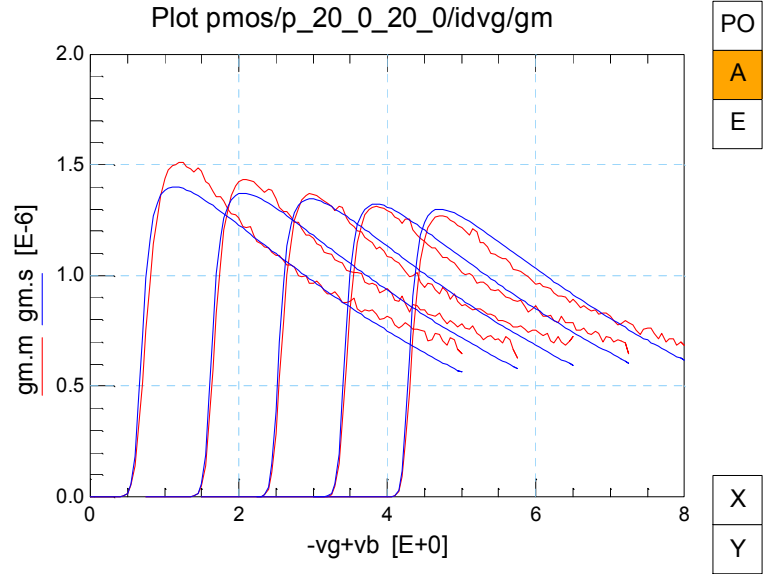
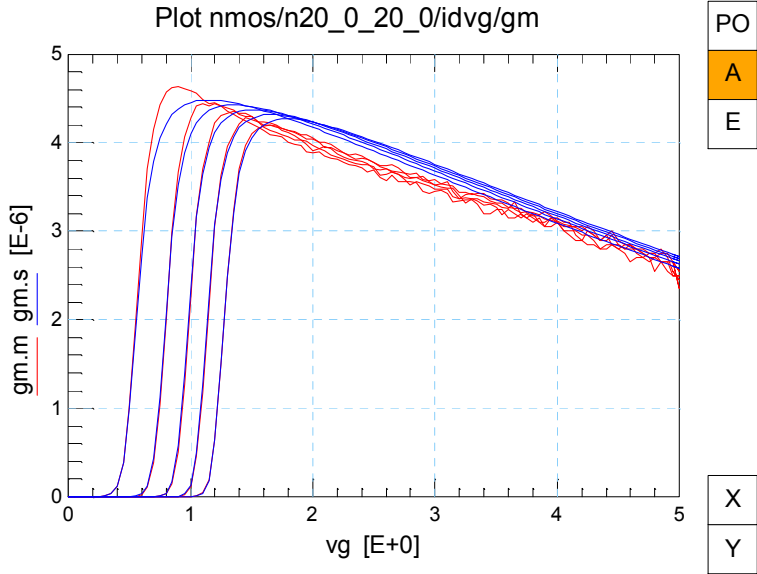
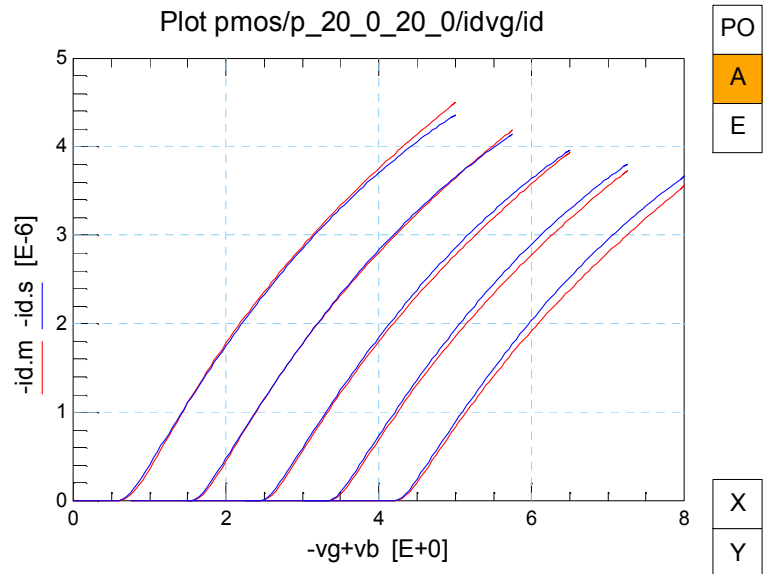
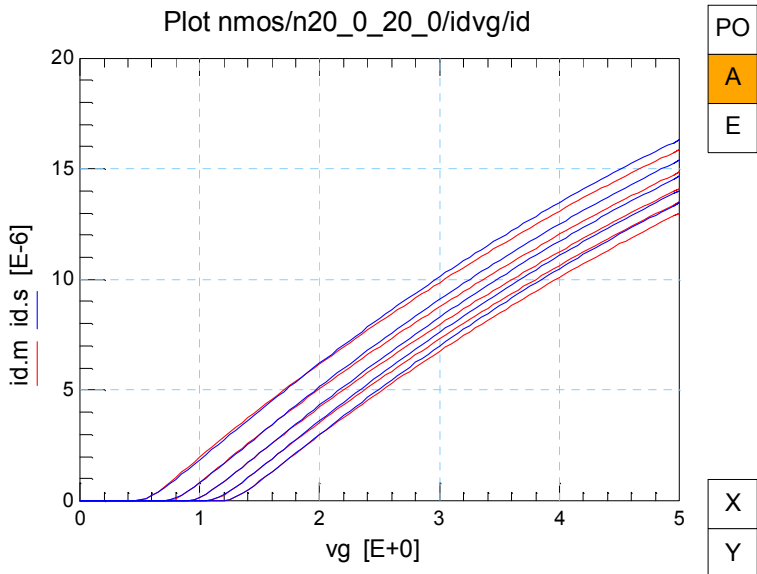
$V_g = -400mV - -5V \text{ step } -1150mV$

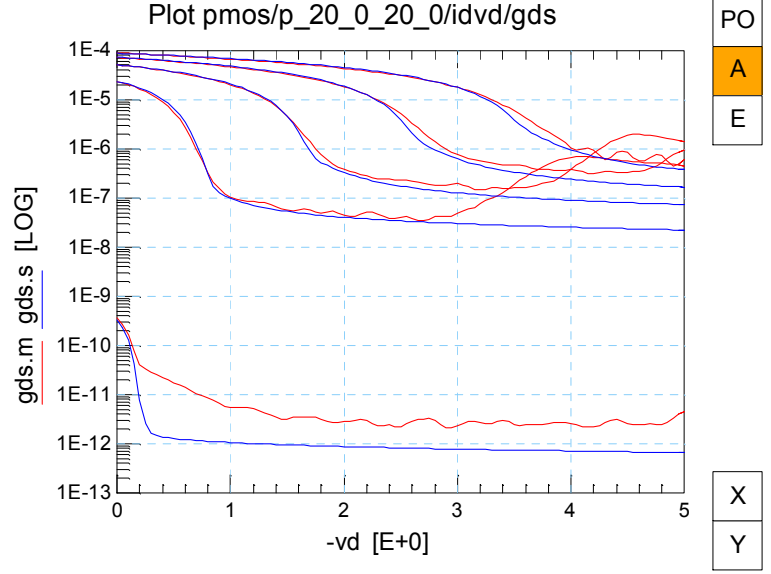
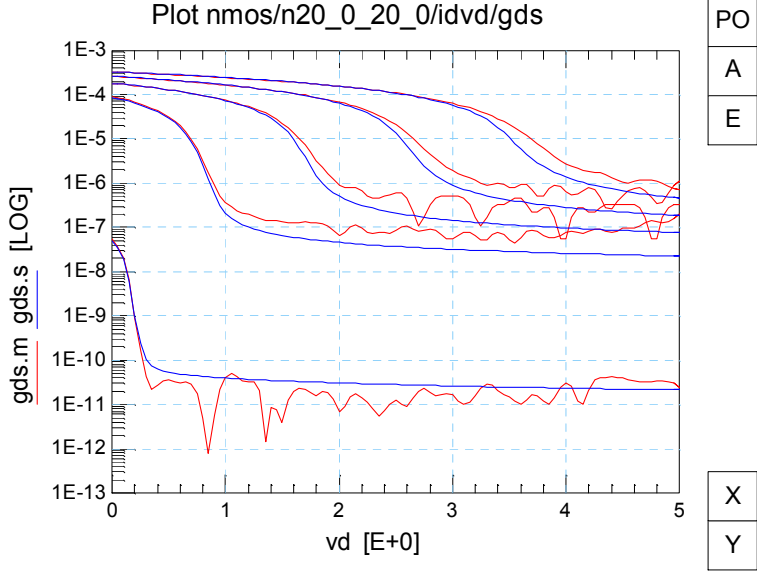
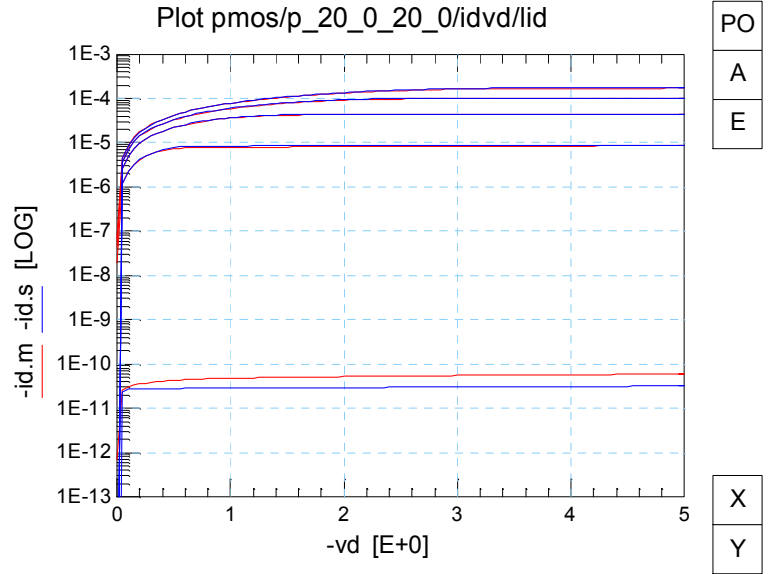
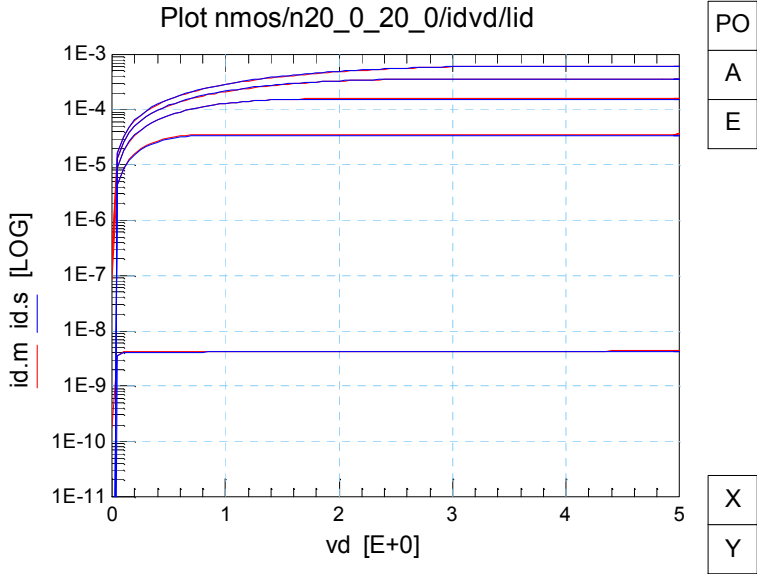
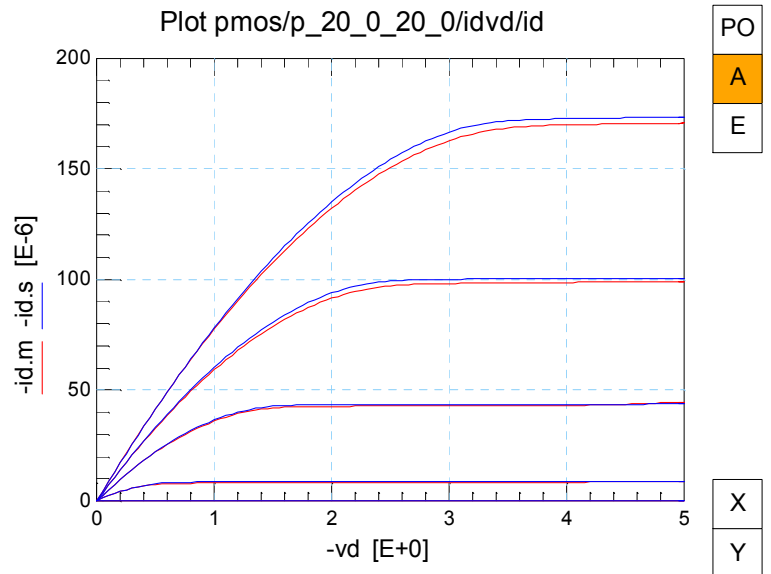
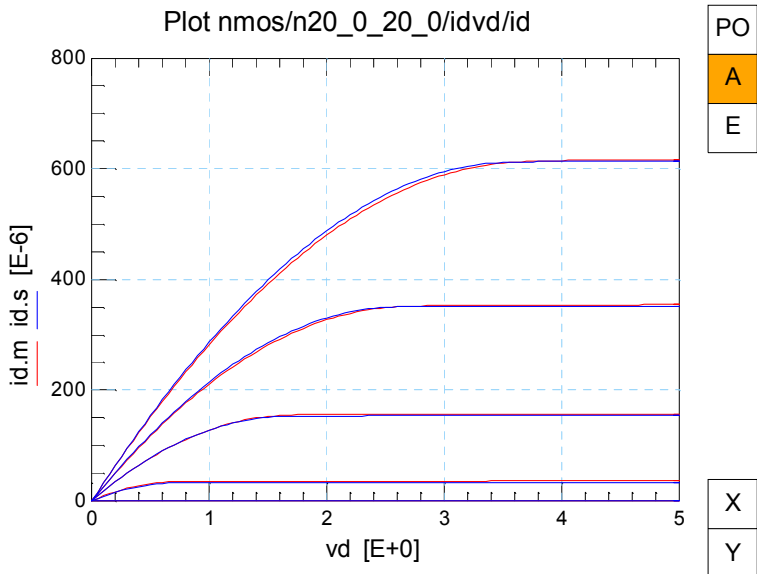
$V_s = 0V$

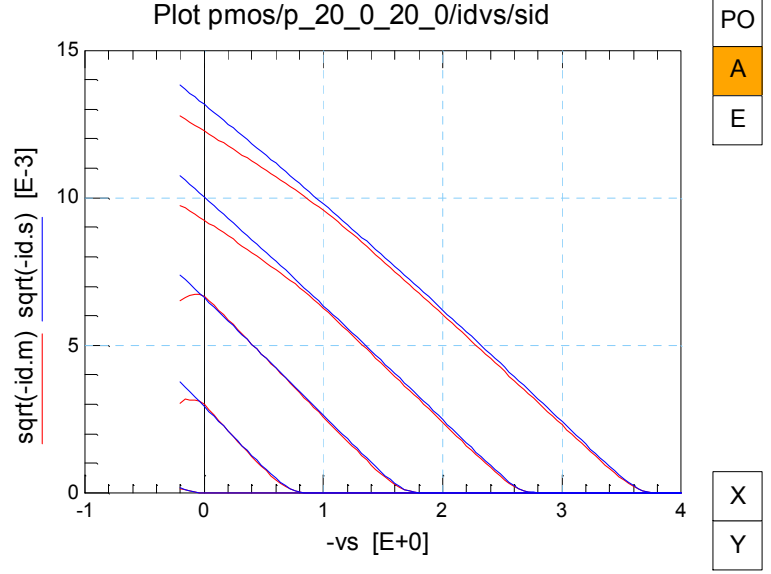
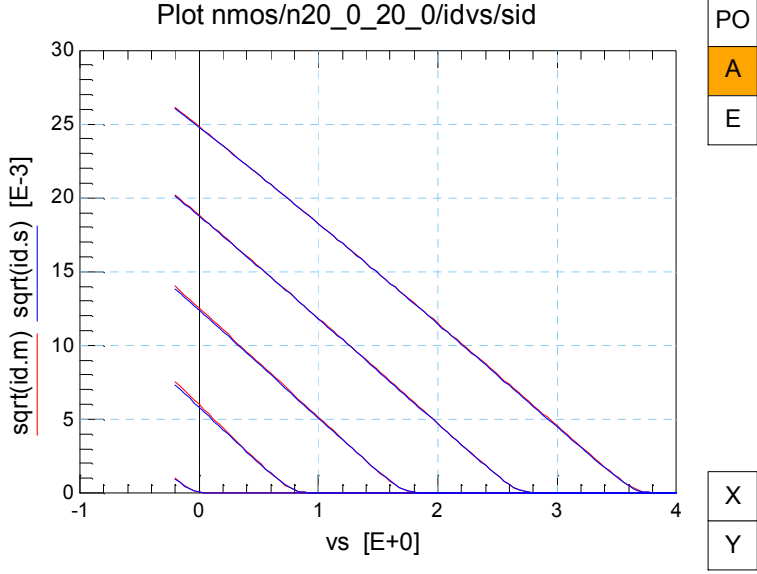
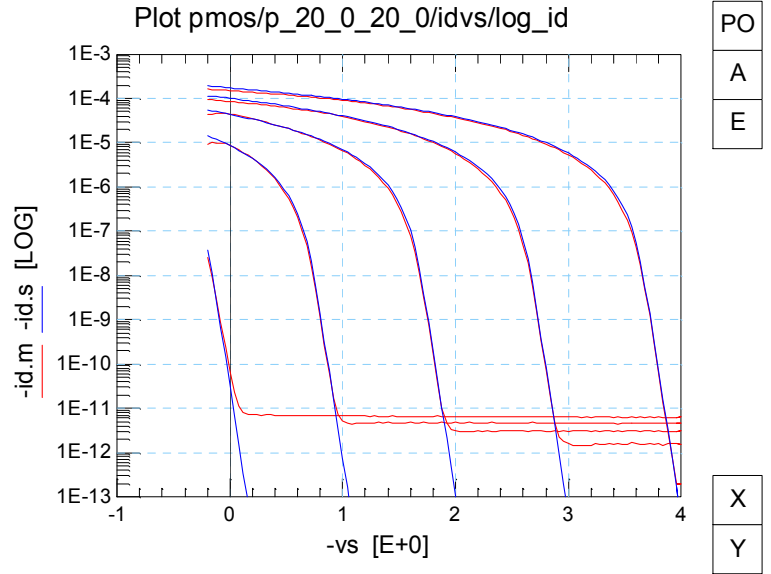
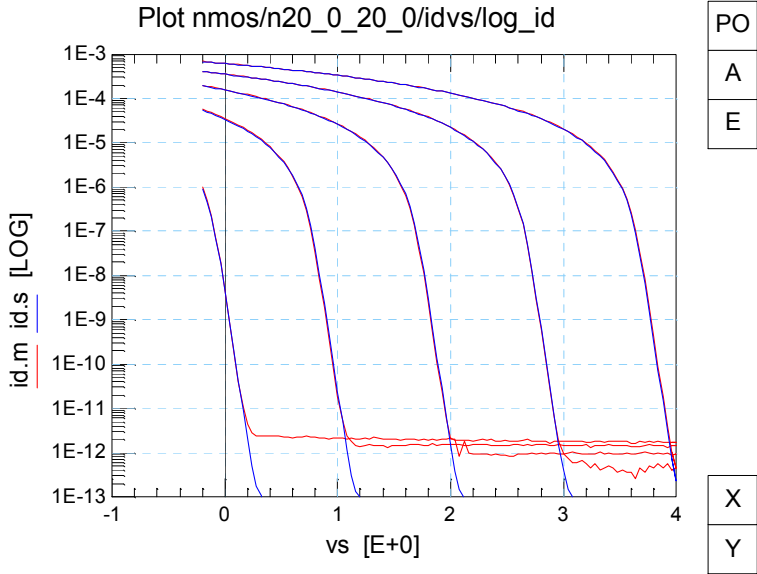
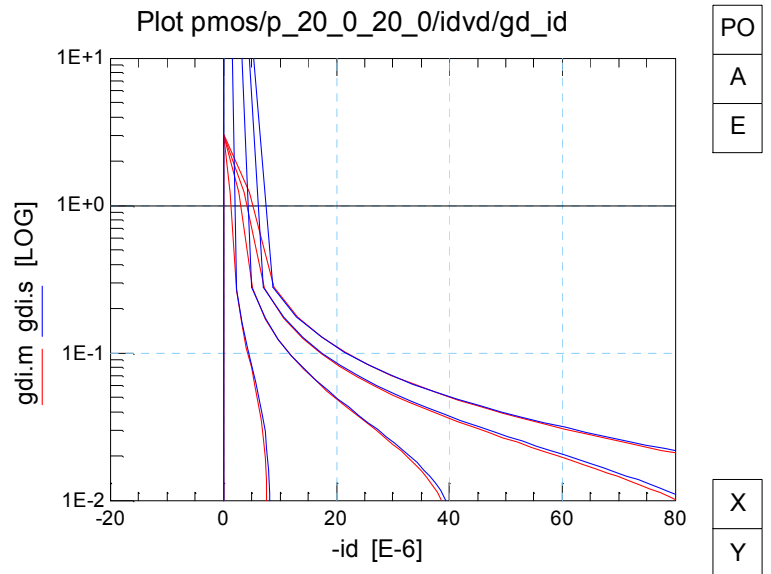
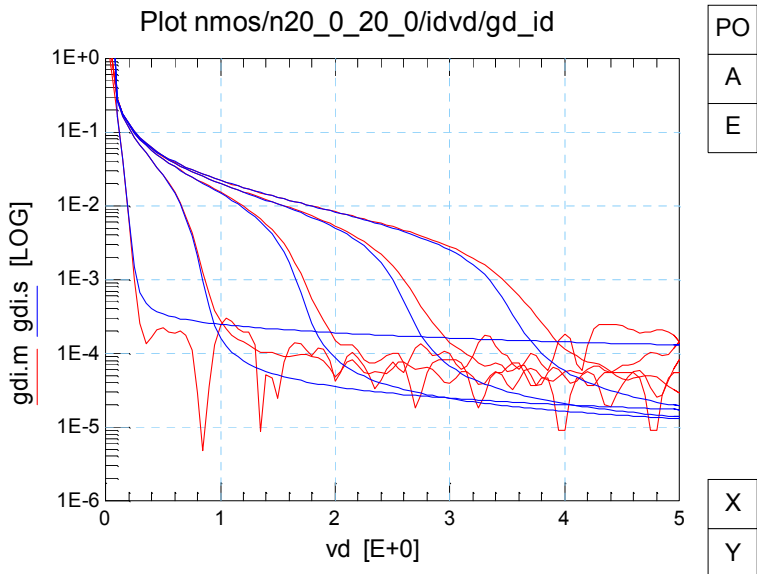
$V_b = 0V$

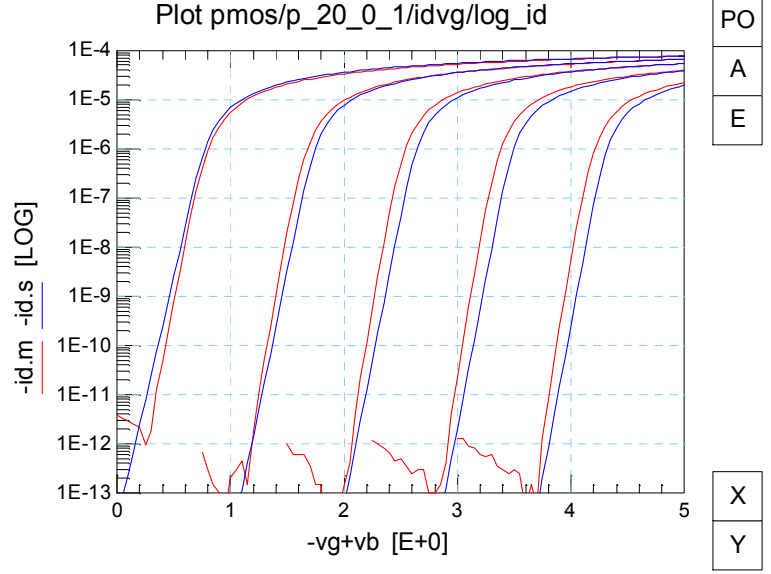
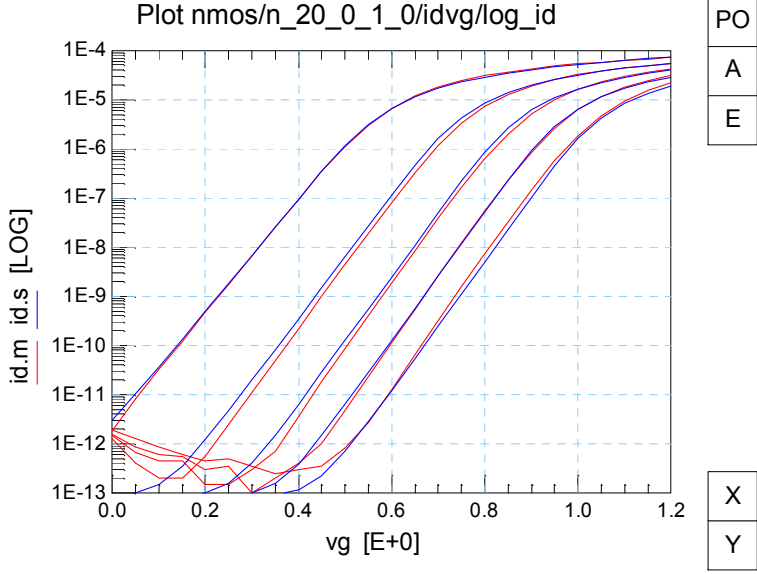
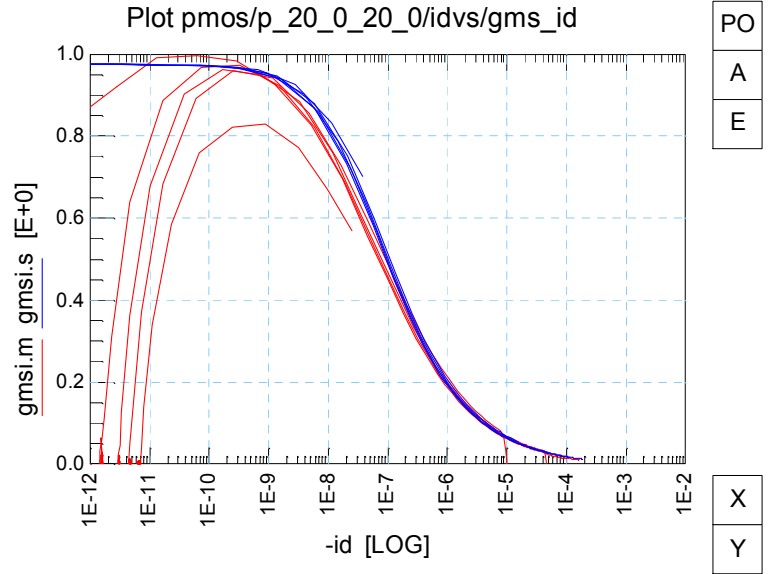
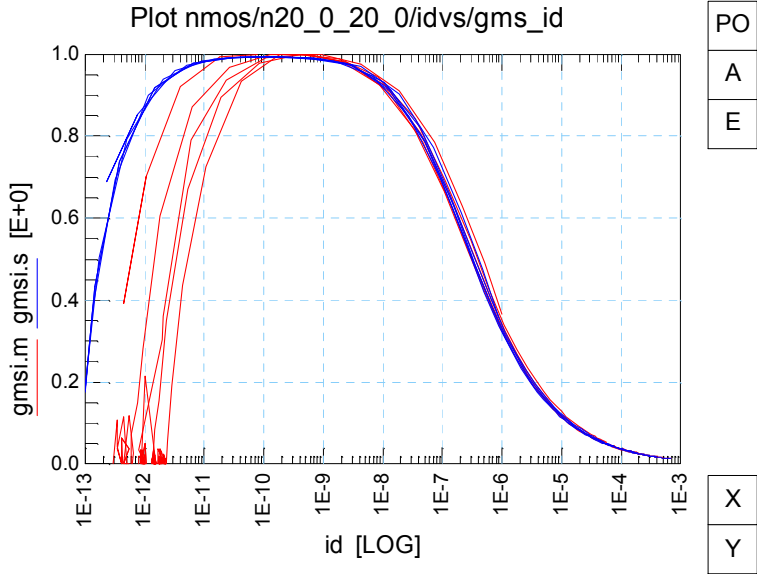
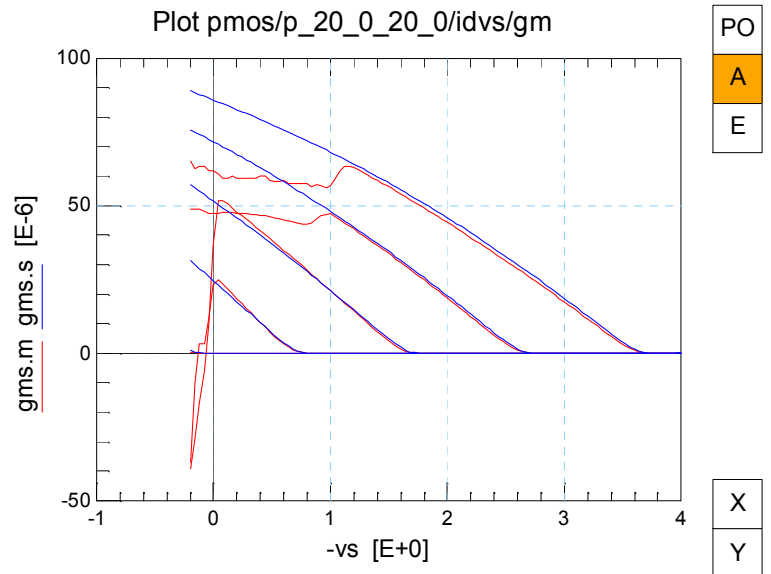
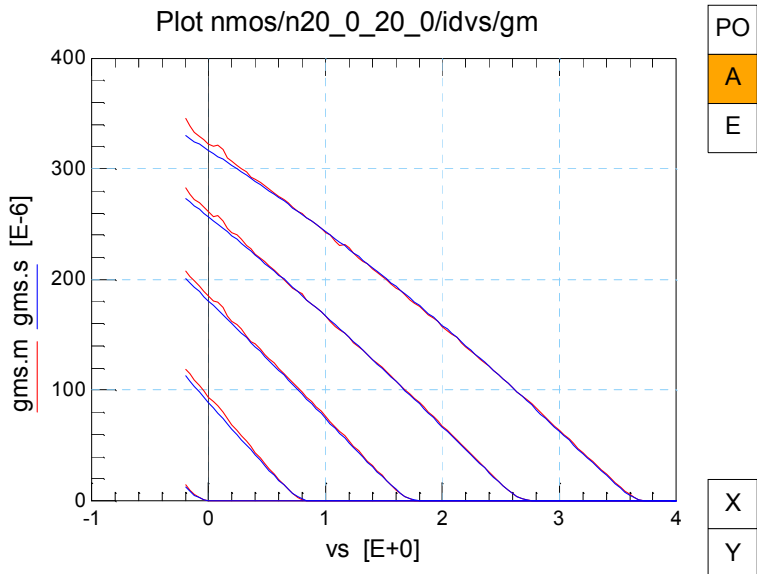
Οι γραφικές παραστάσεις που θα παρατεθούν παρακάτω, είναι για NMOS και για PMOS. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται κάθε φορά η γραφική παράσταση που προκύπτει από το μετρούμενο κάθε φορά ρεύμα, ενώ με μπλε χρώμα παρουσιάζεται στην ίδια γραφική, αυτό που προκύπτει μετά την προσομοίωση. Η προσομοίωση έχει γίνει με τιμές παραμέτρων που έχουν δοθεί από τον χρήστη χειροκίνητα και όχι με τιμές που έχουν προέλθει από το σύστημα εξαγωγής παραμέτρων.

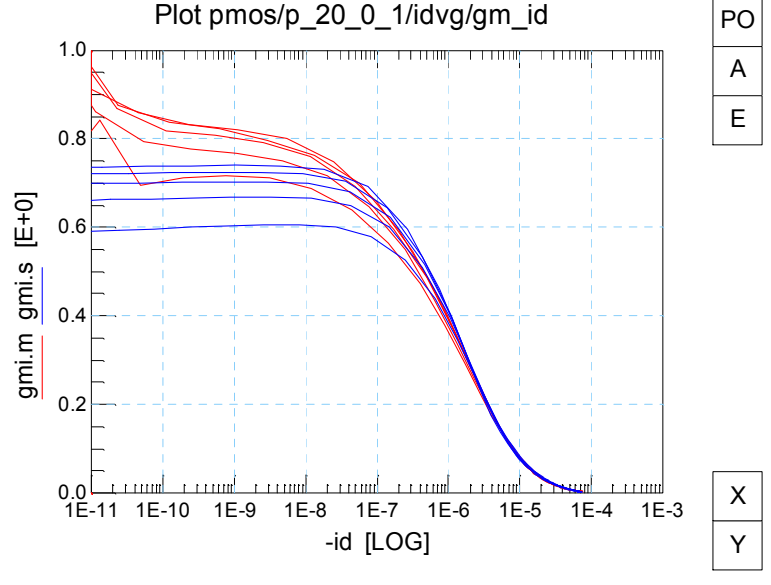
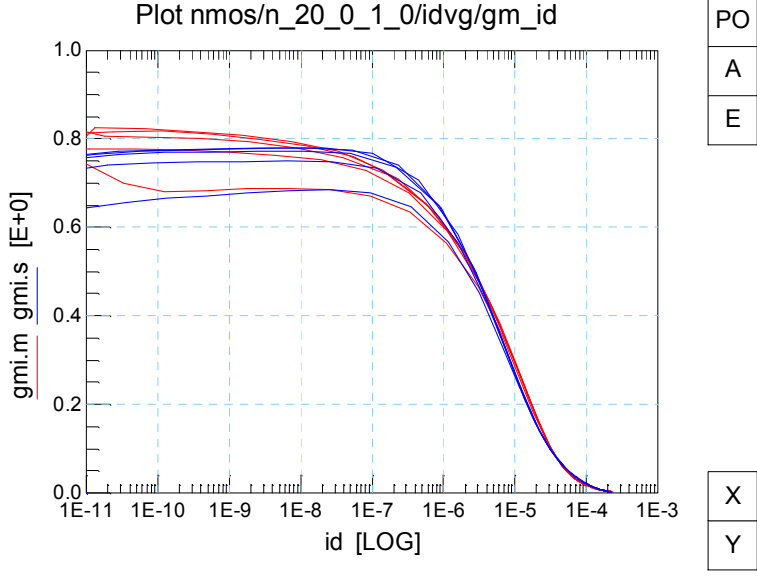
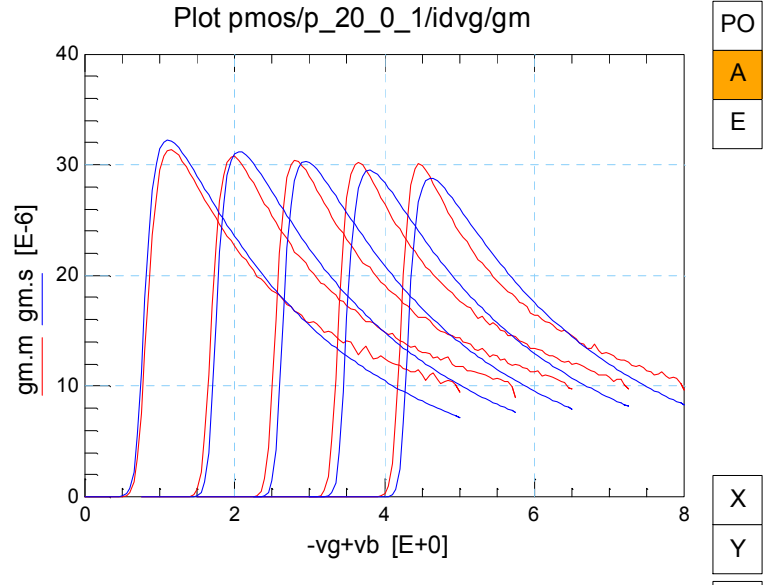
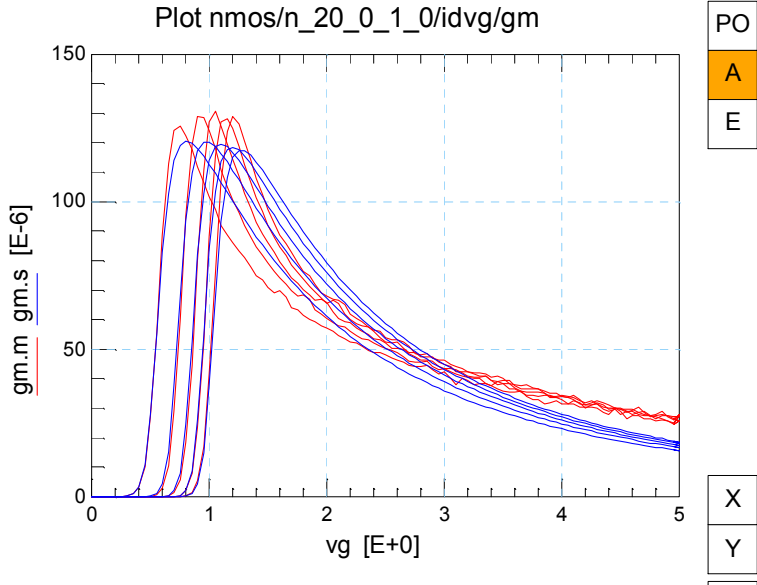
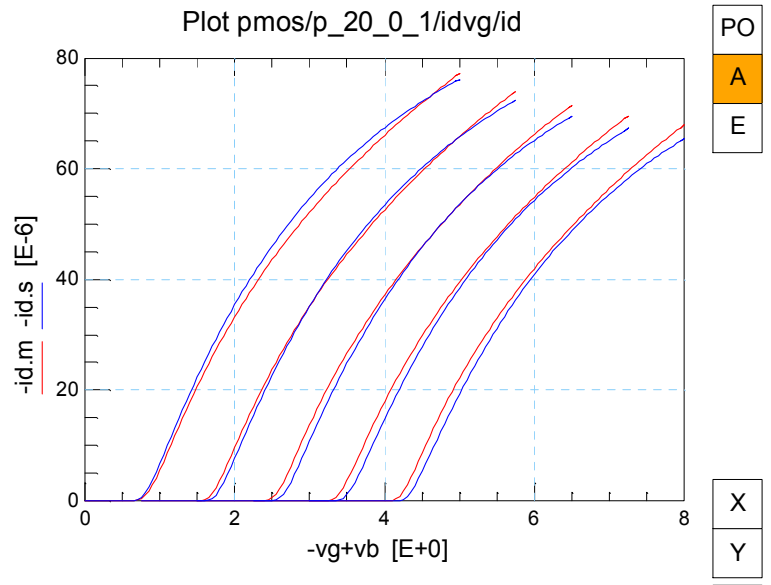
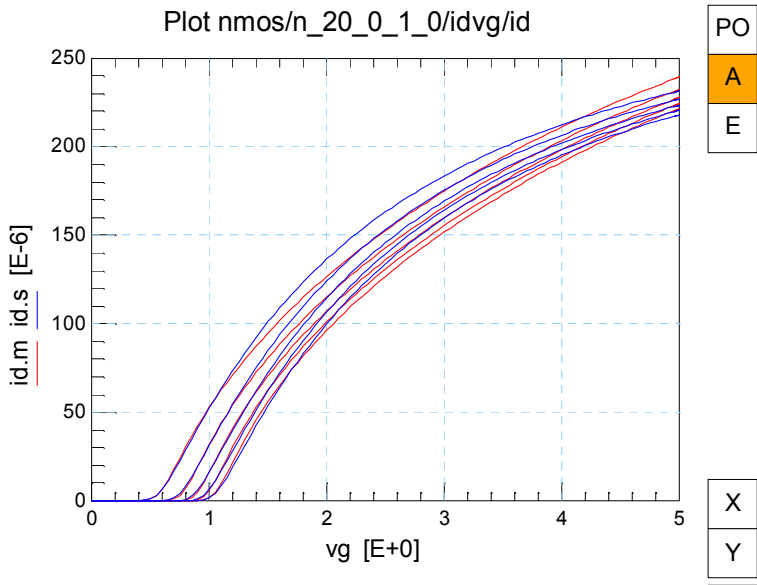


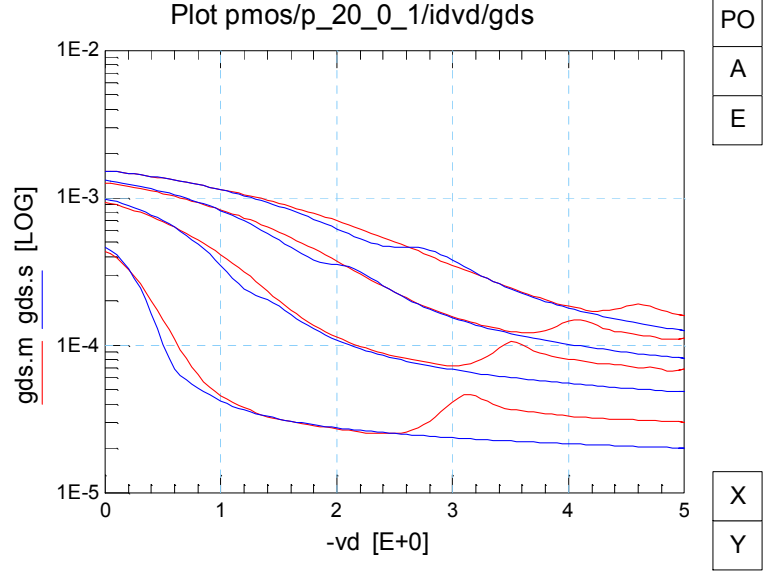
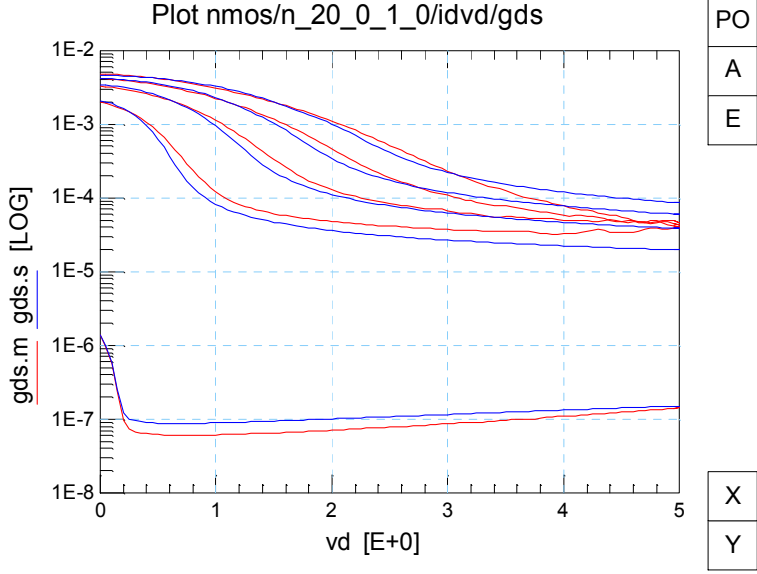
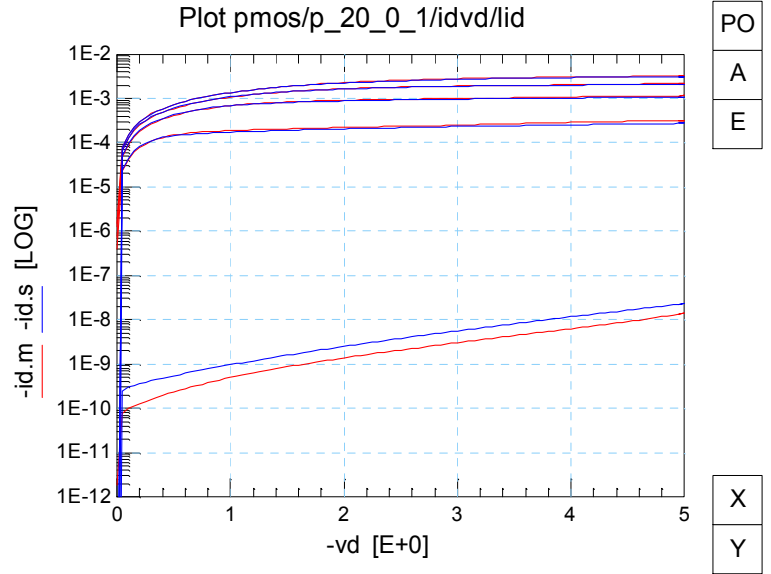
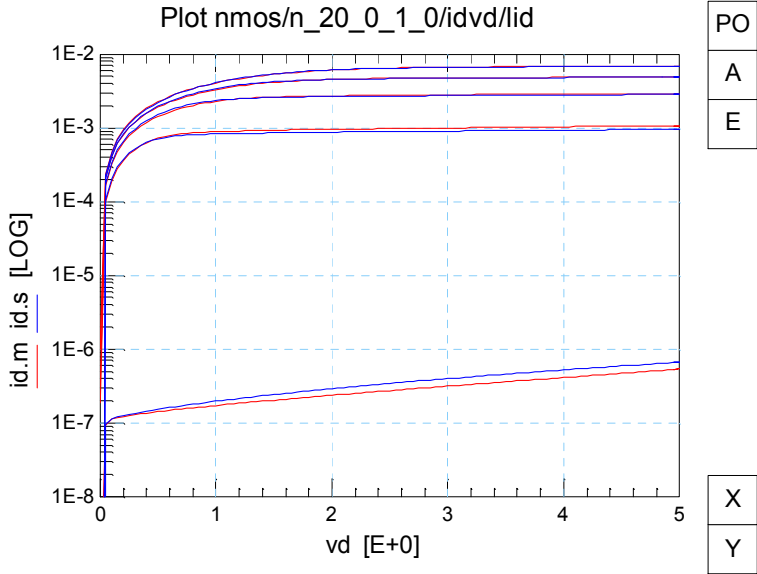
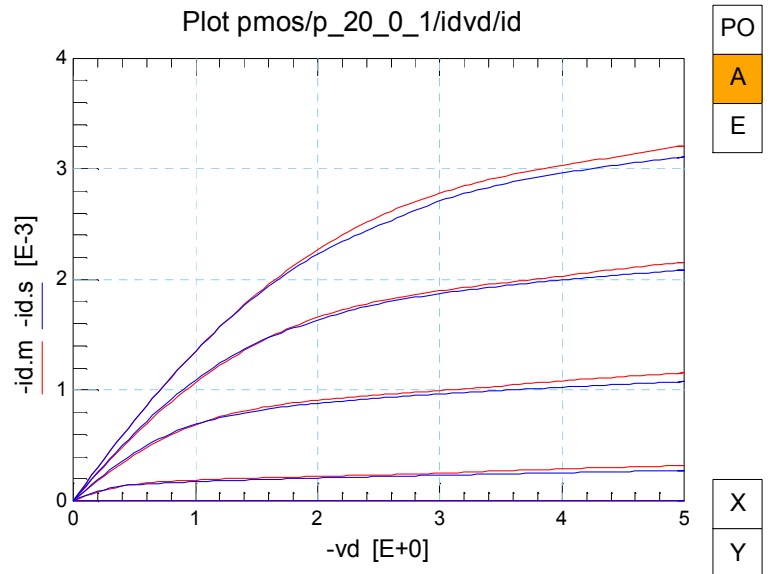
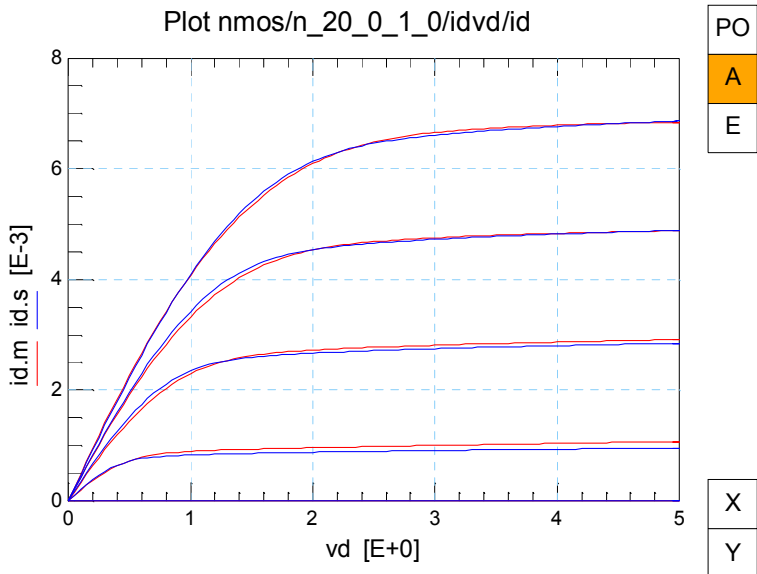


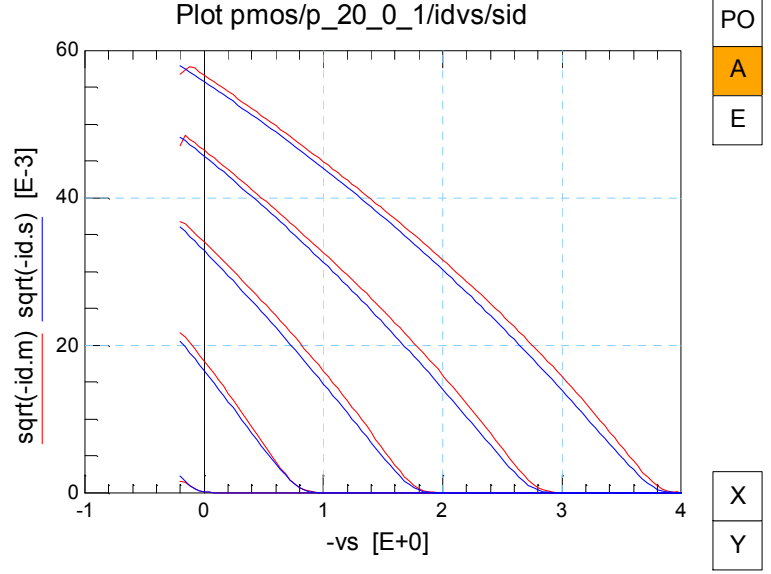
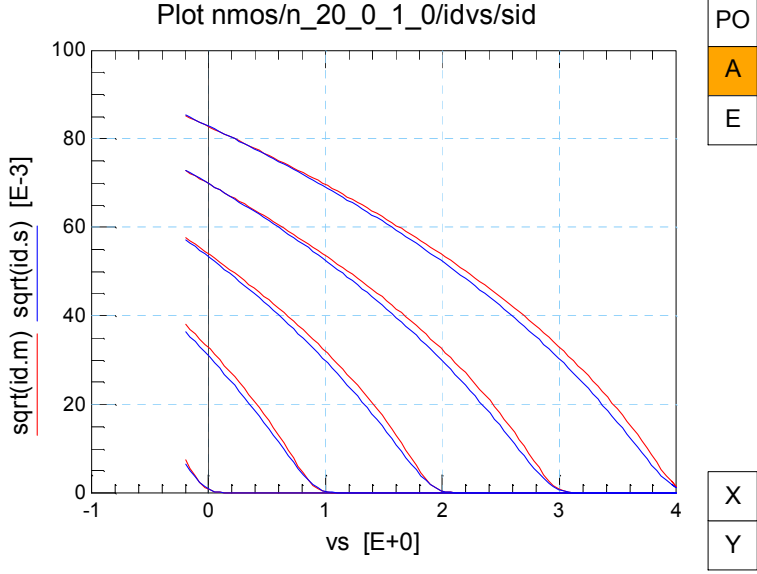
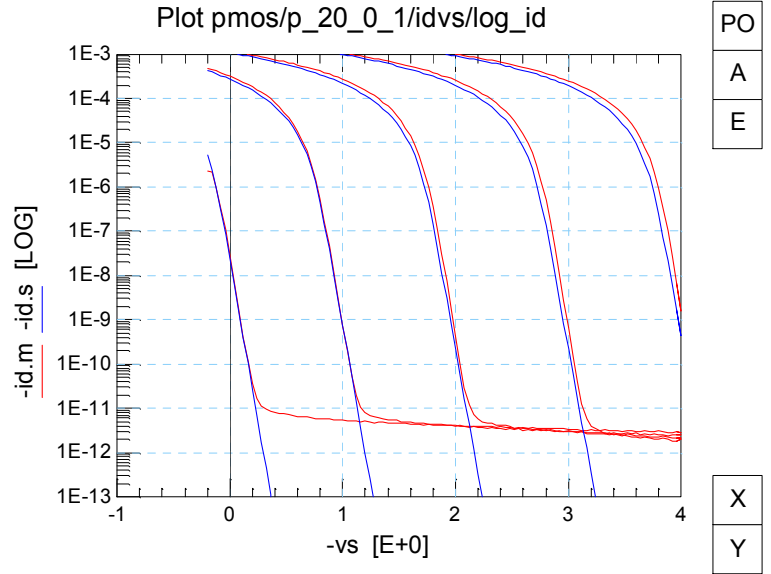
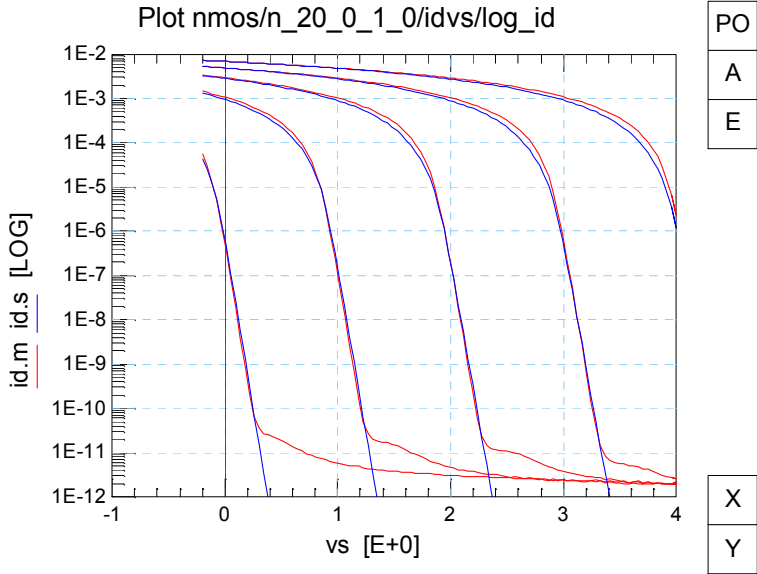
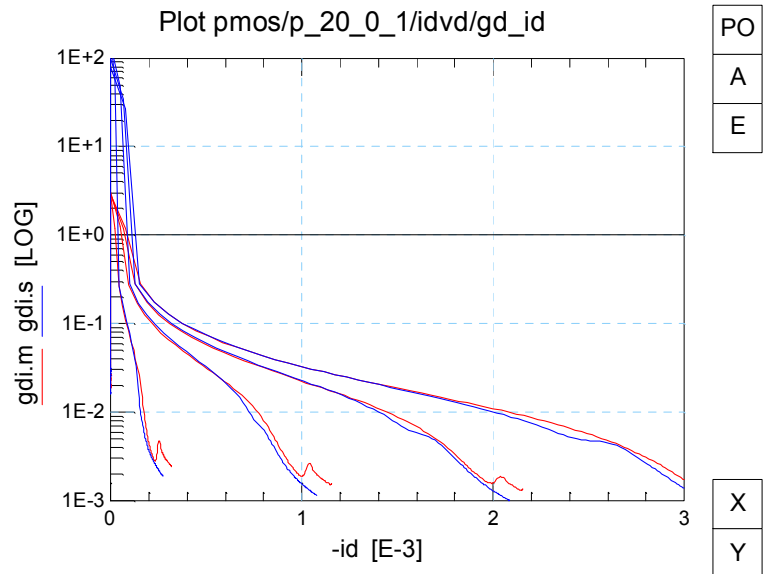
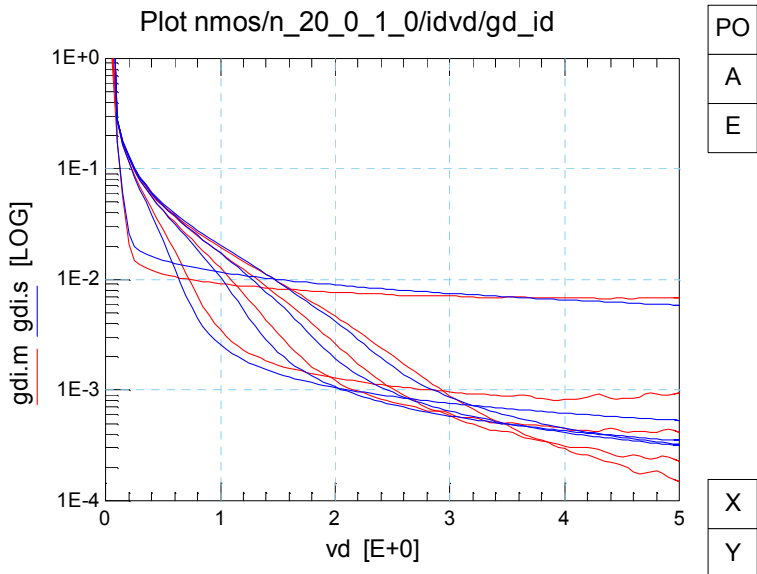


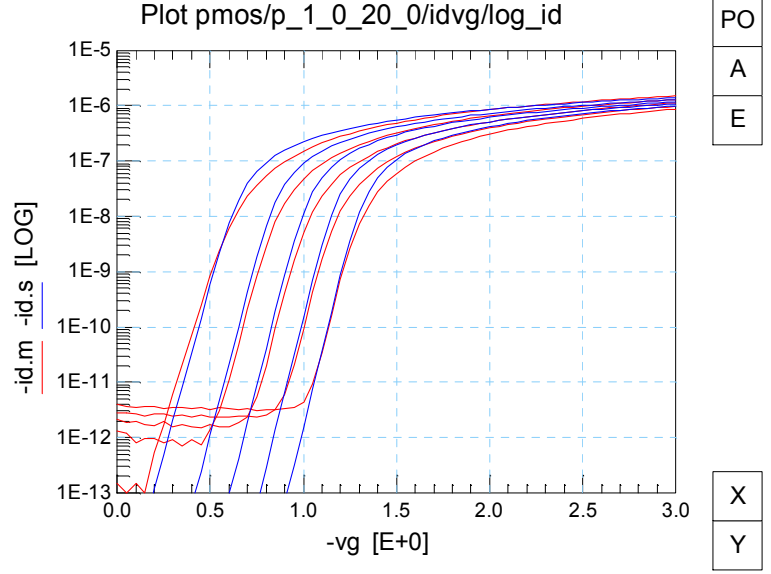
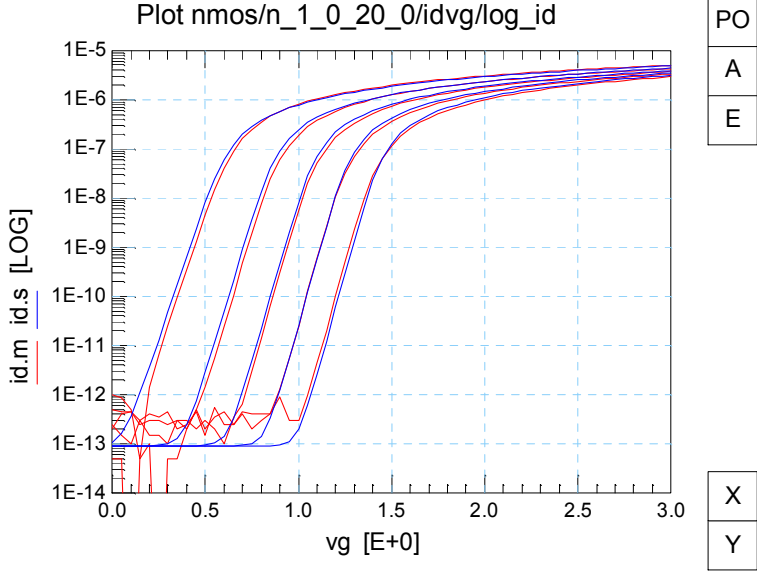
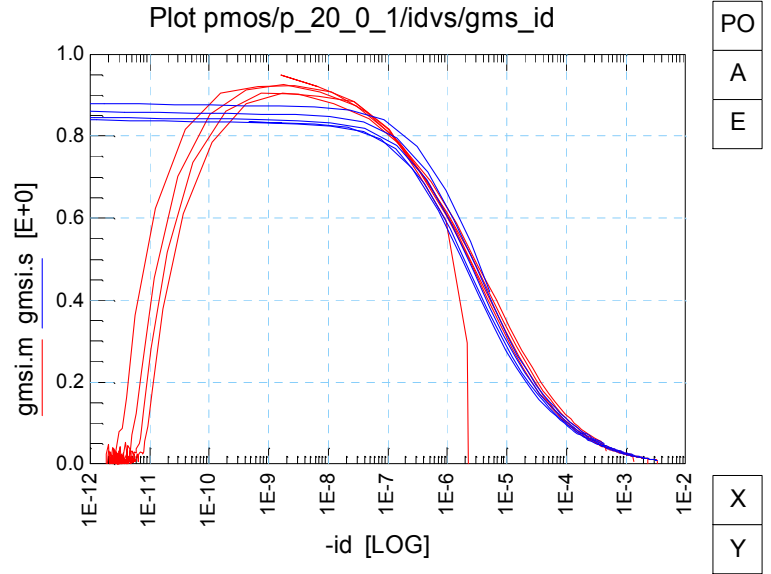
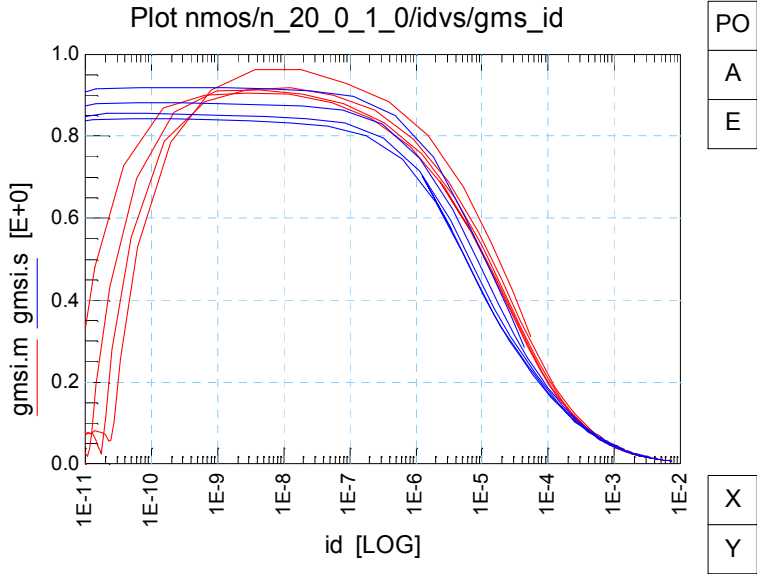
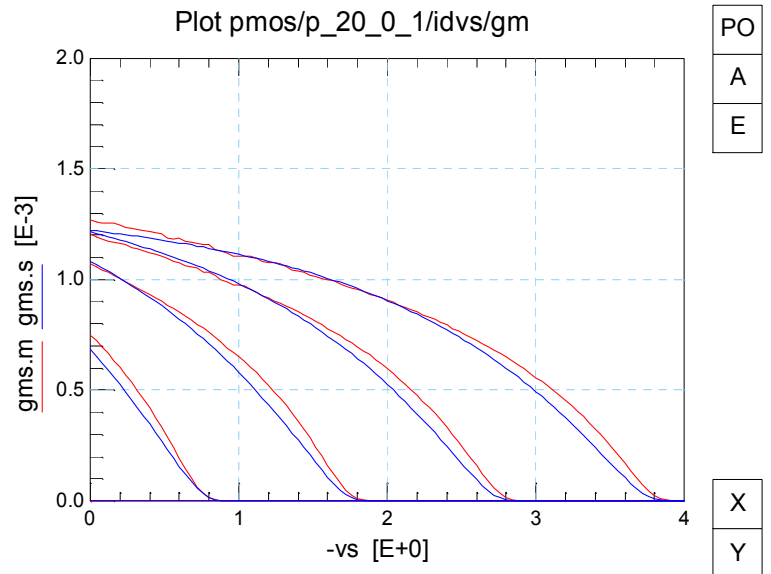
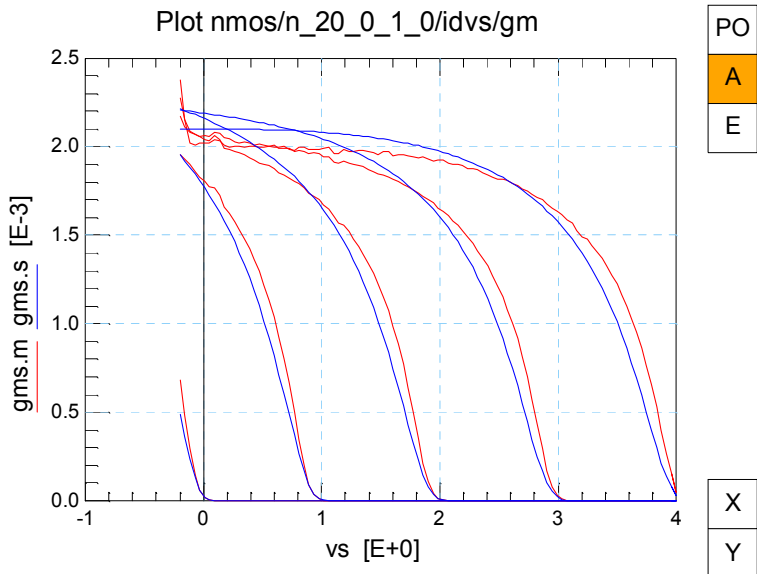


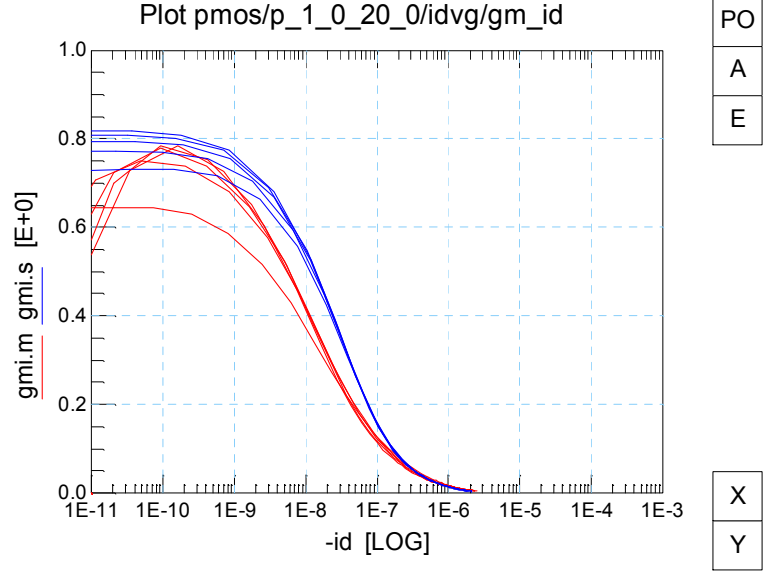
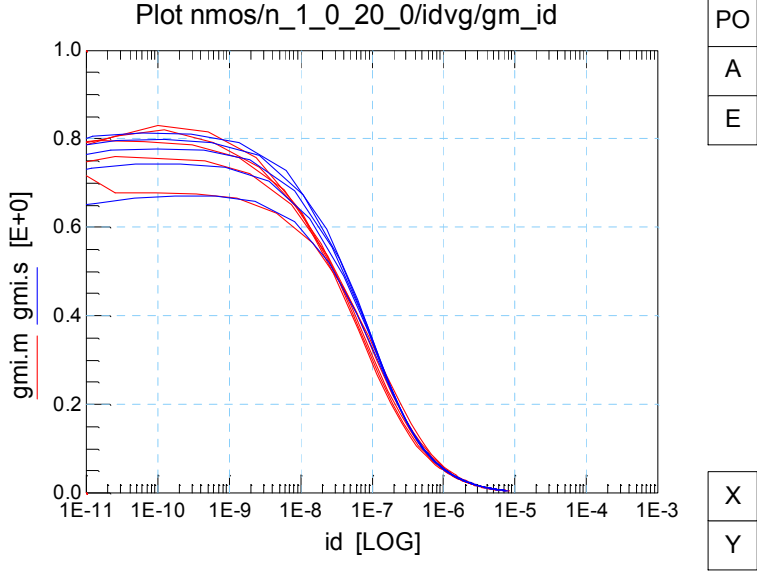
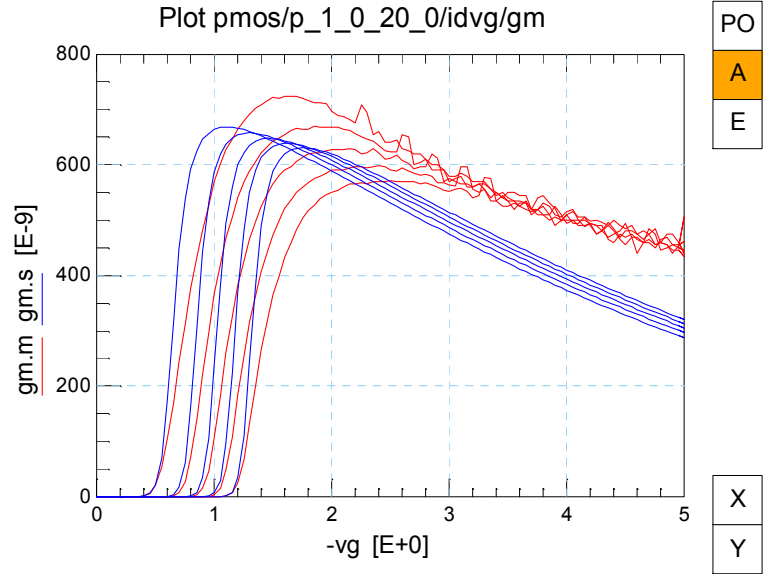
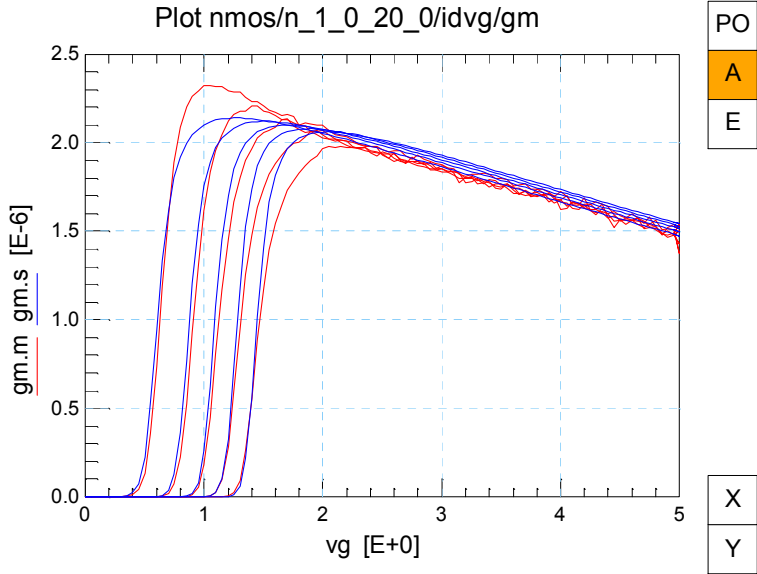
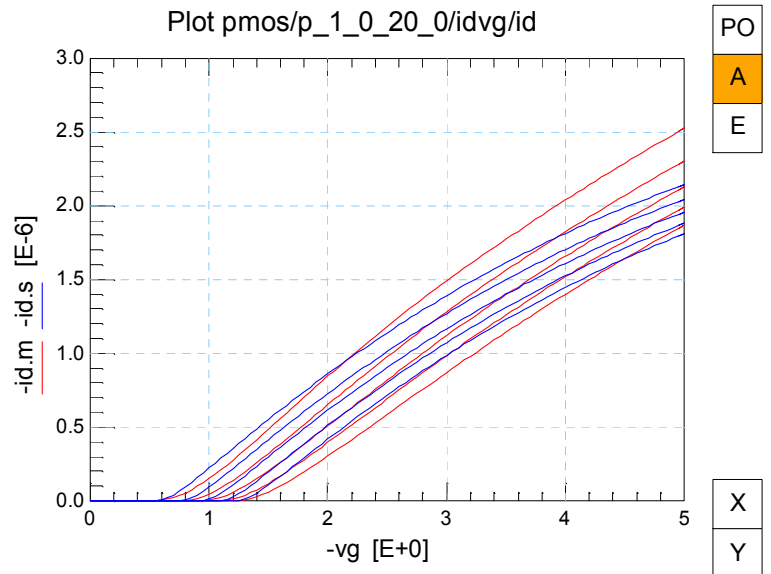
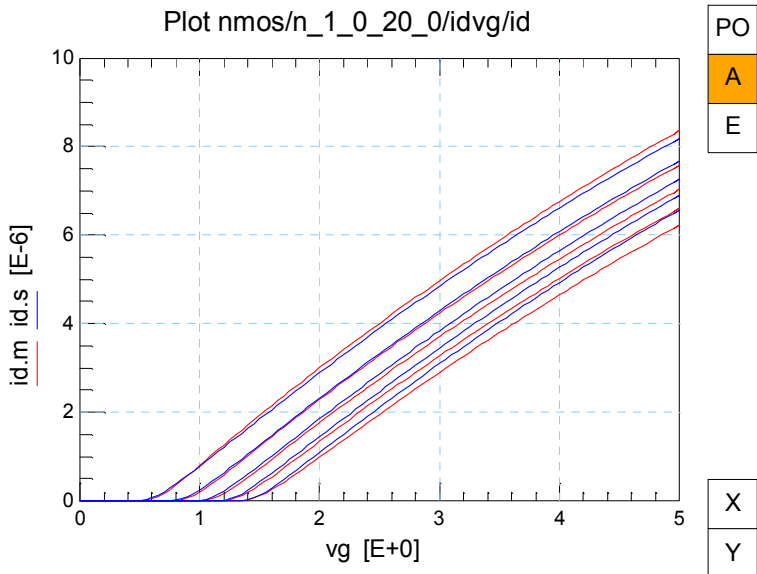


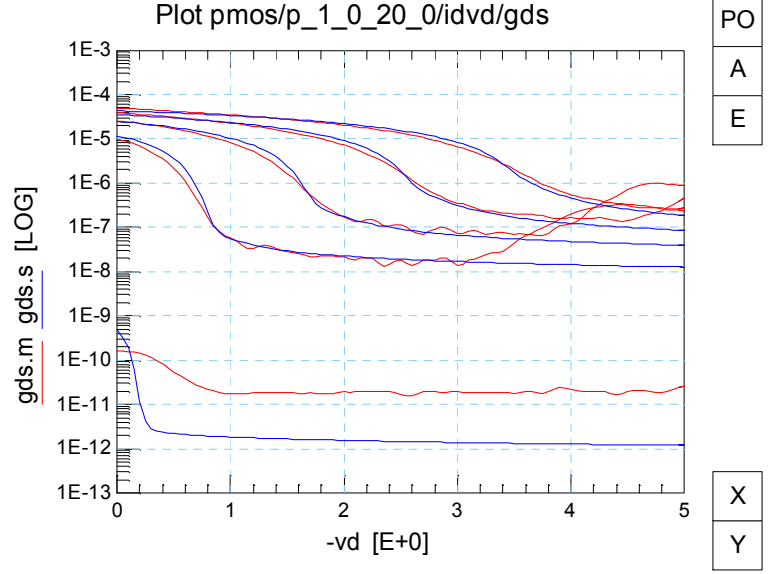
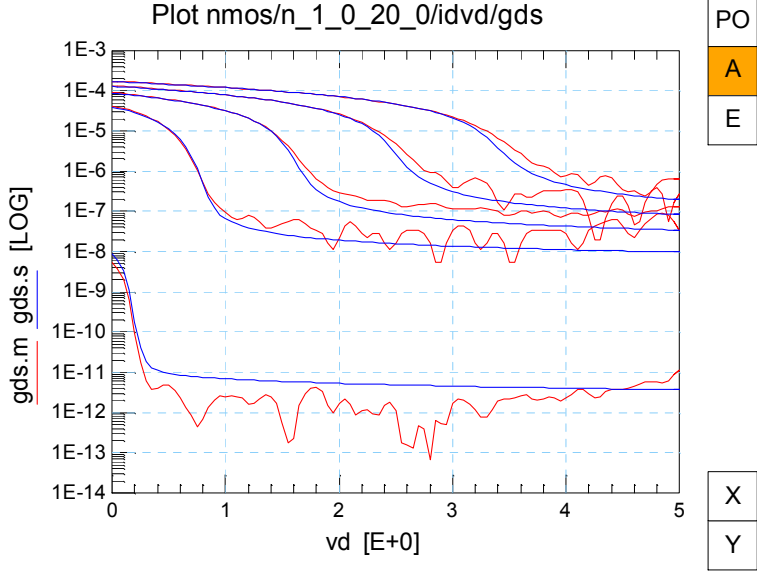
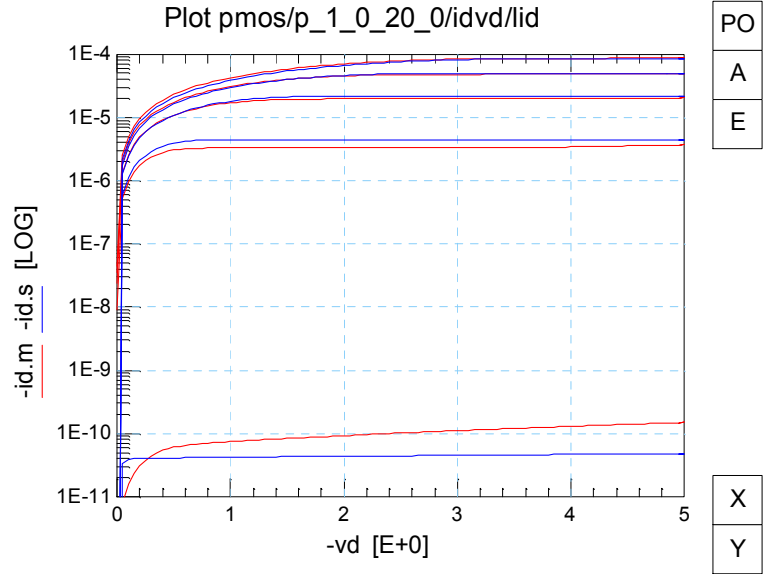
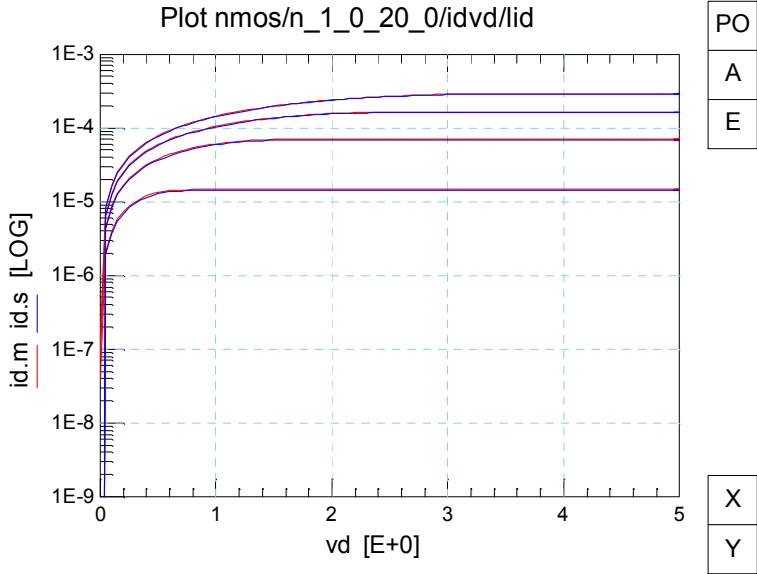
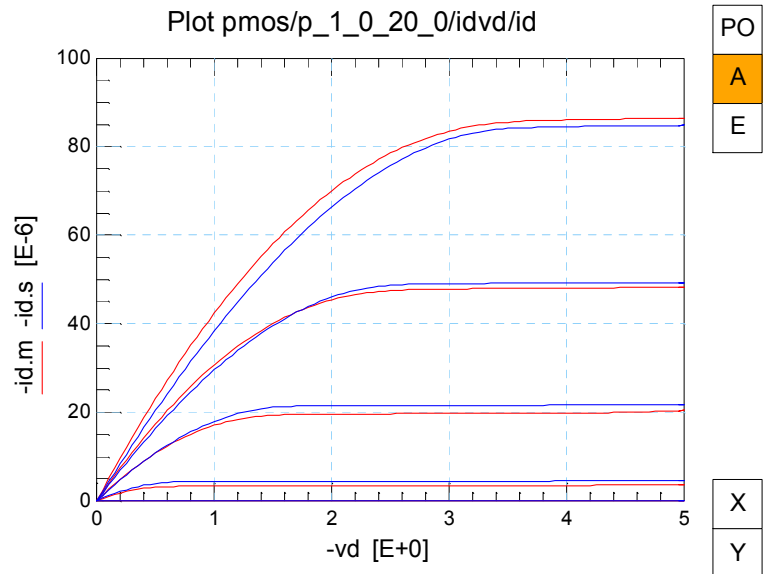
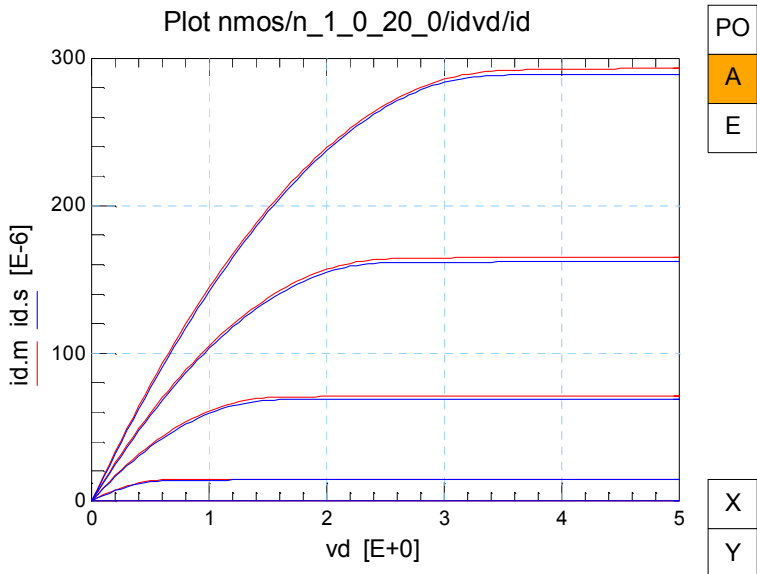


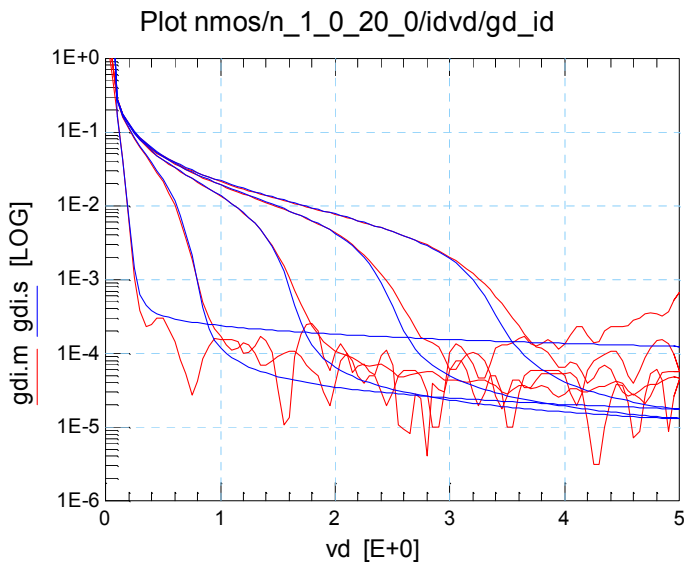






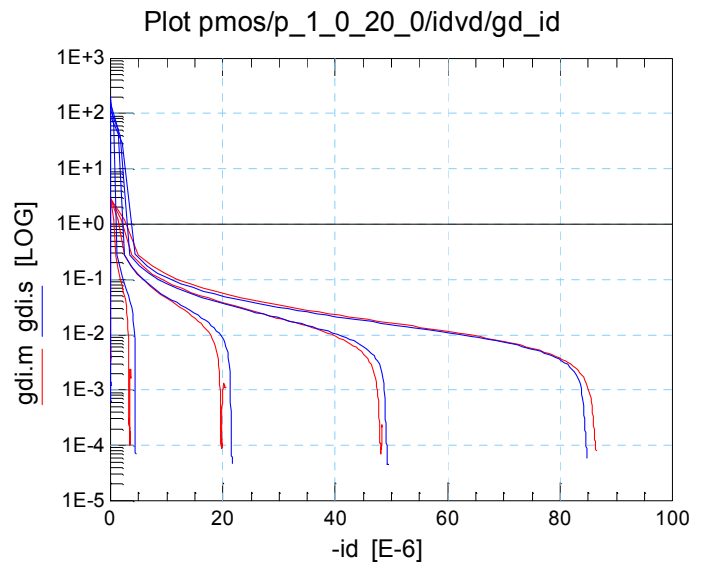






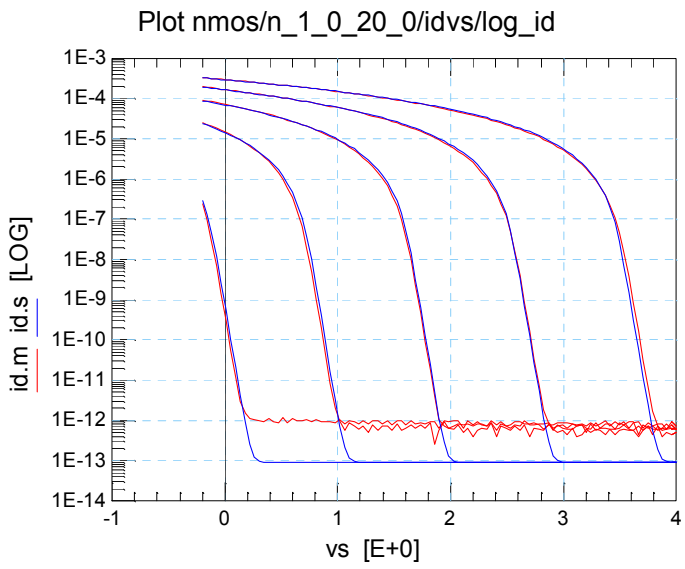
PO
A
E

X
Y



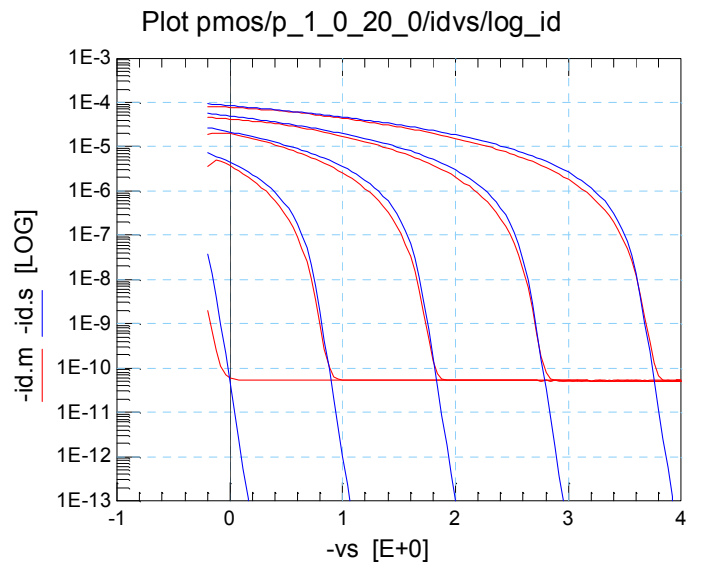
PO
A
E

X
Y



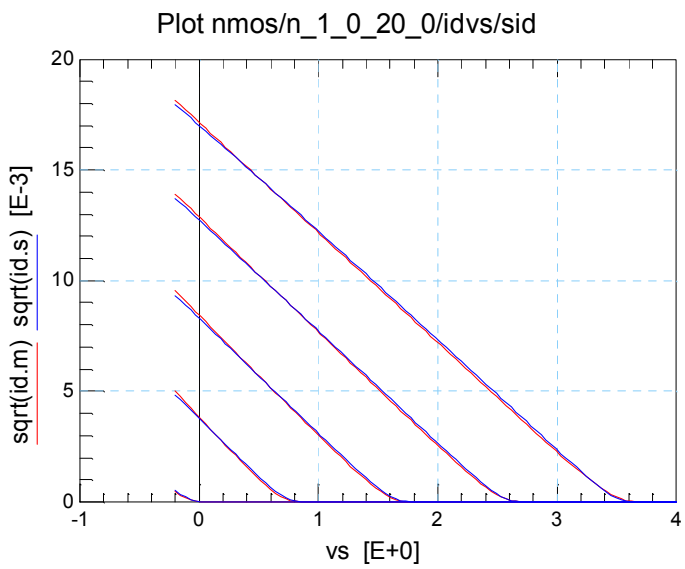
PO
A
E

X
Y



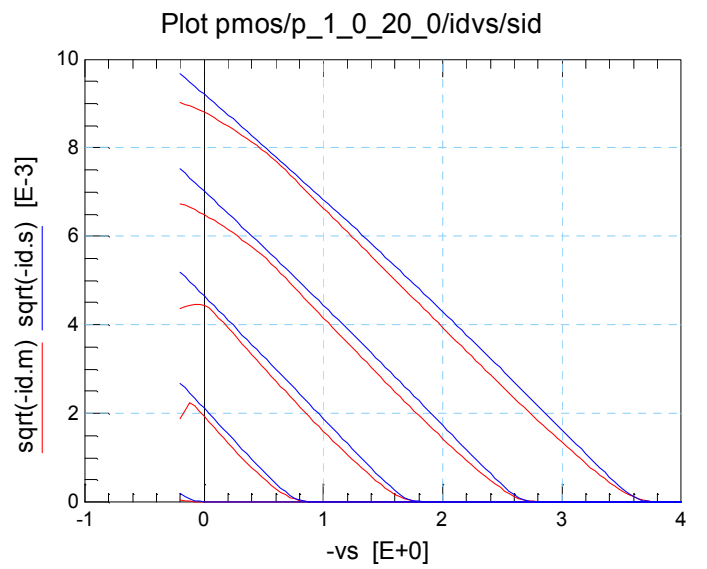
PO
A
E

X
Y



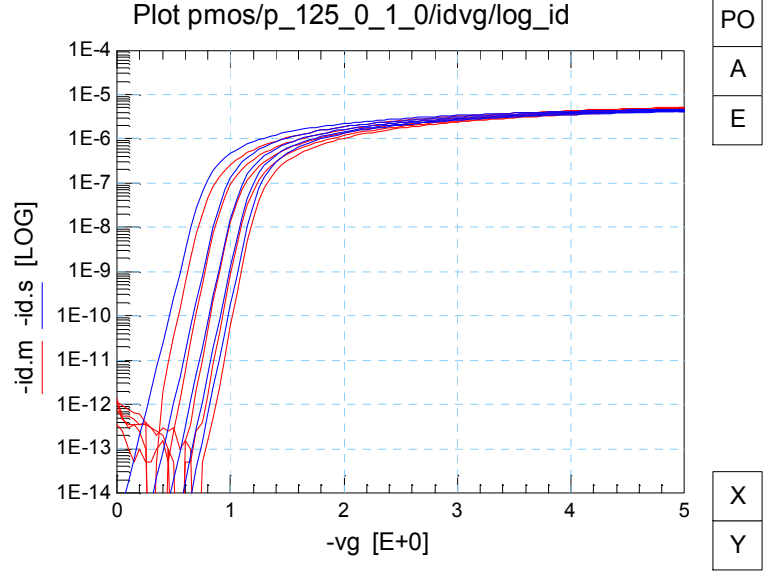
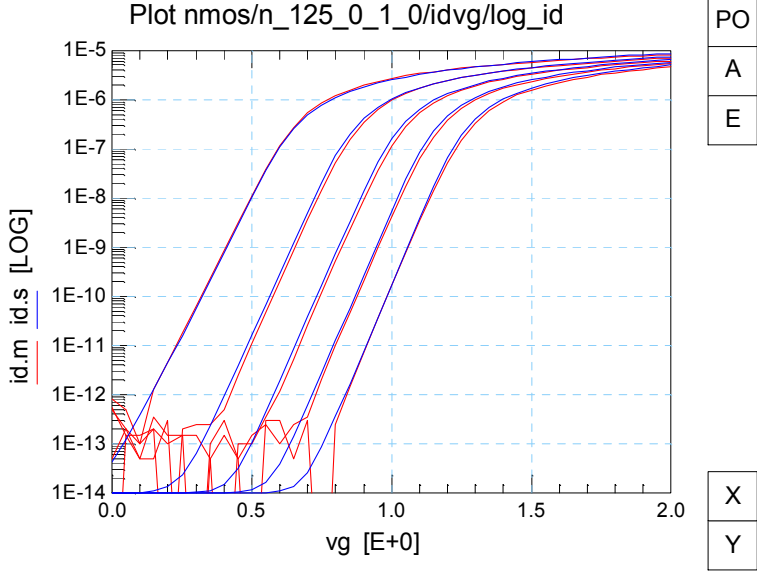
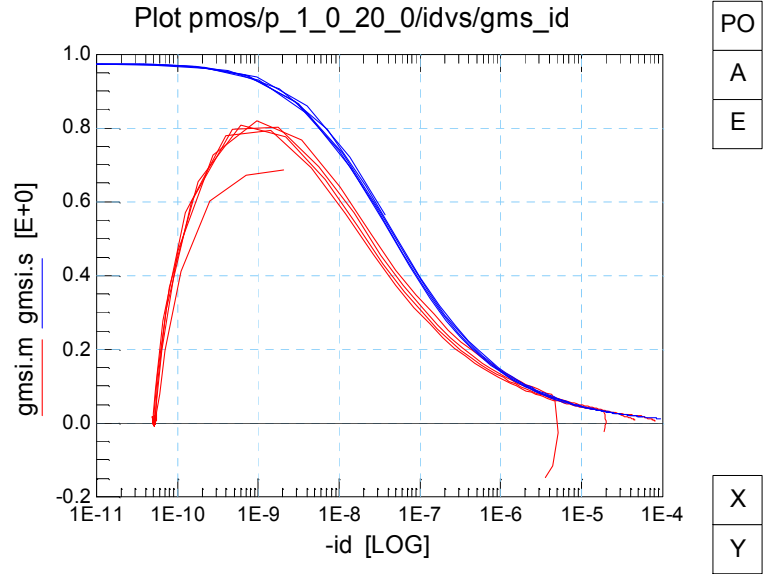
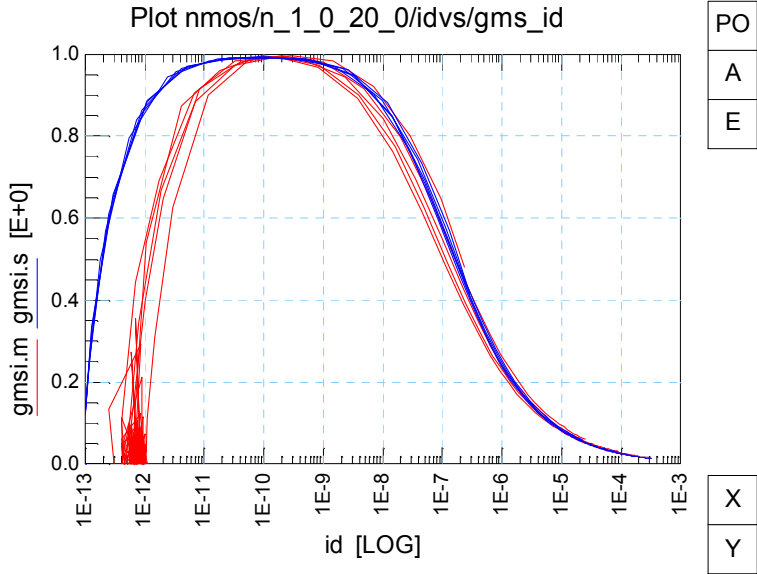
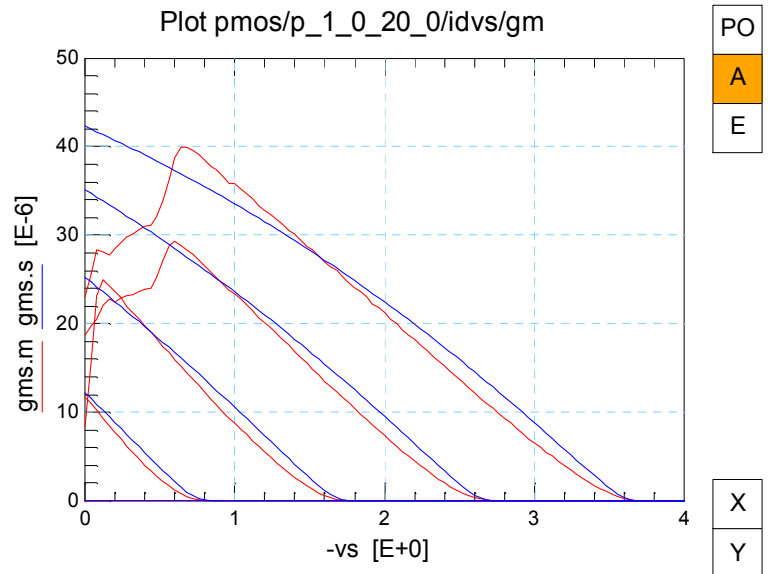
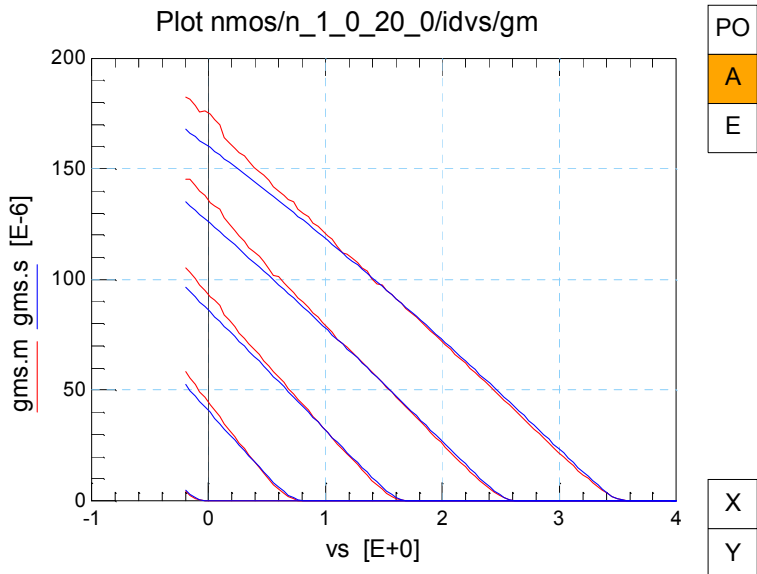
PO
A
E

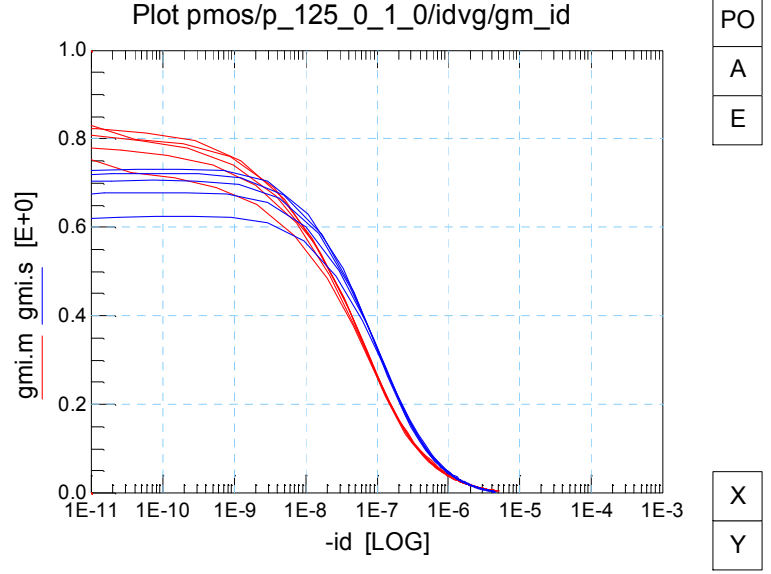
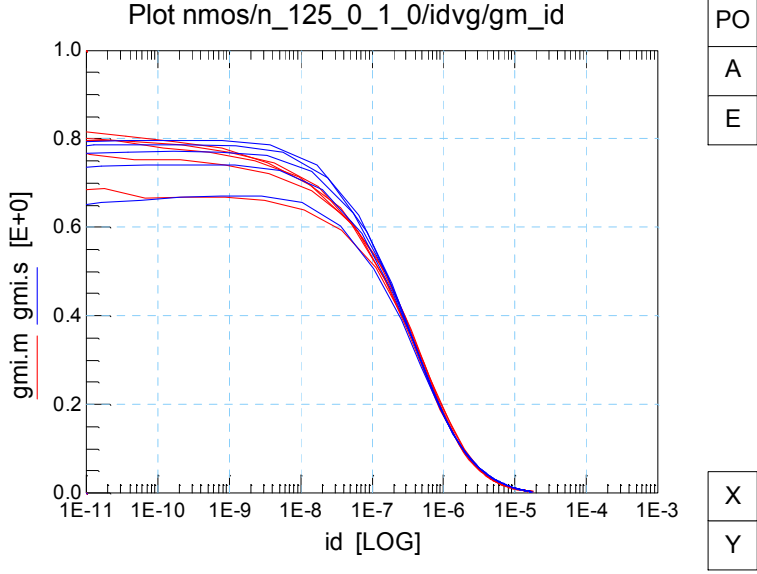
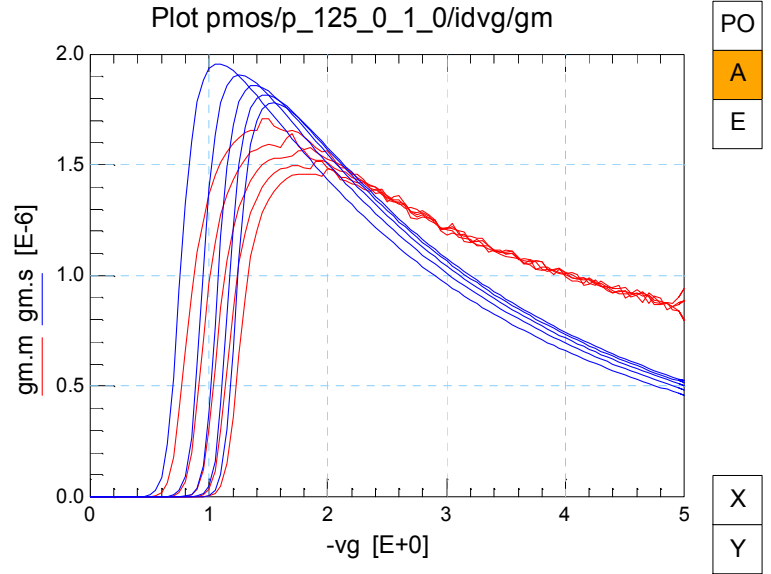
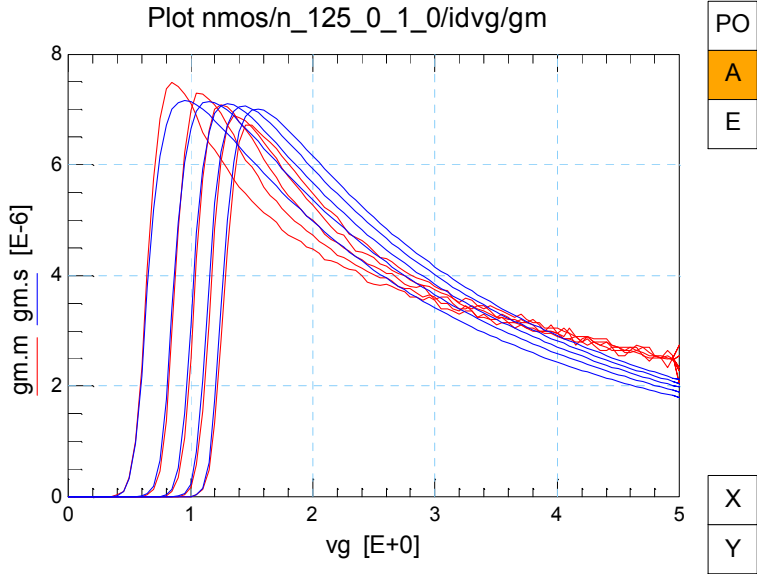
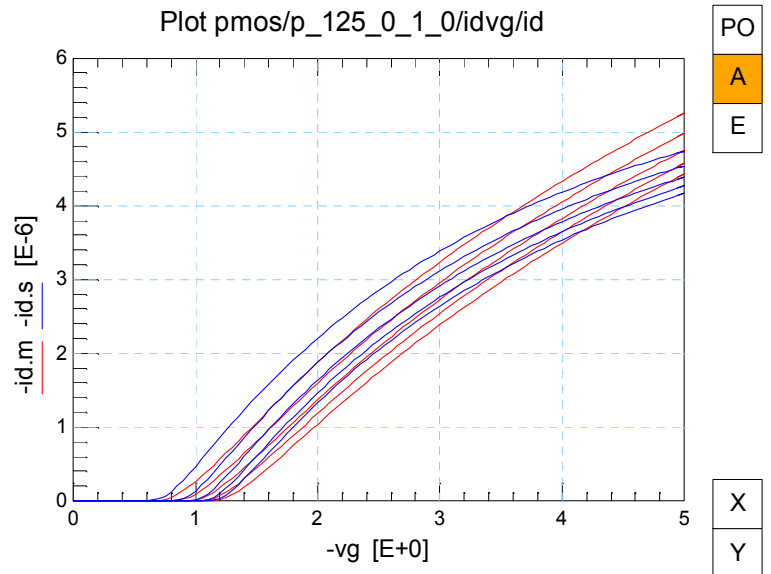
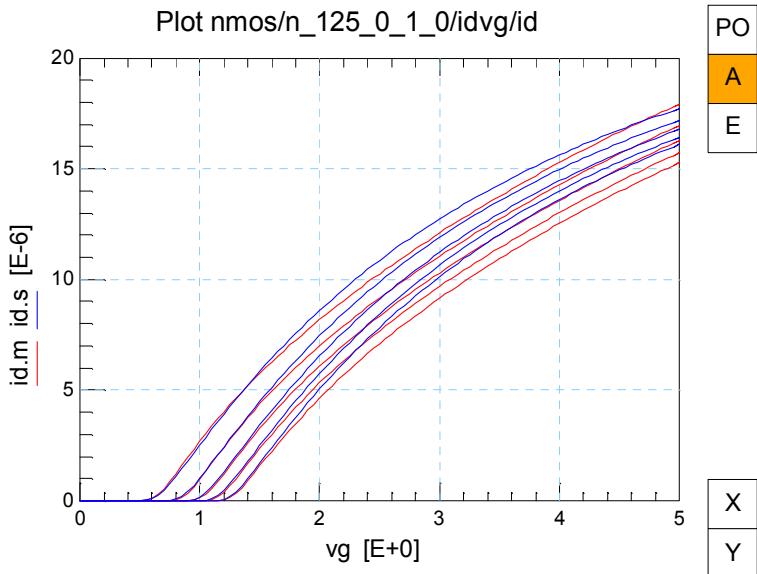
X
Y

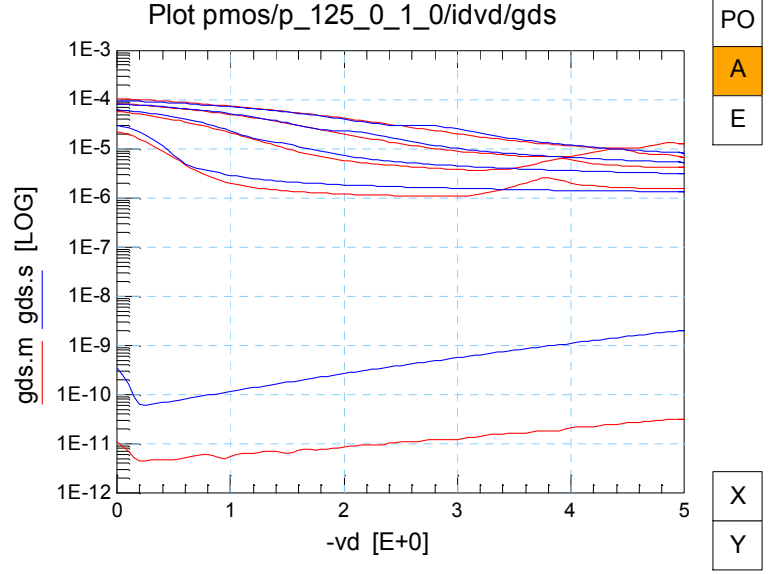
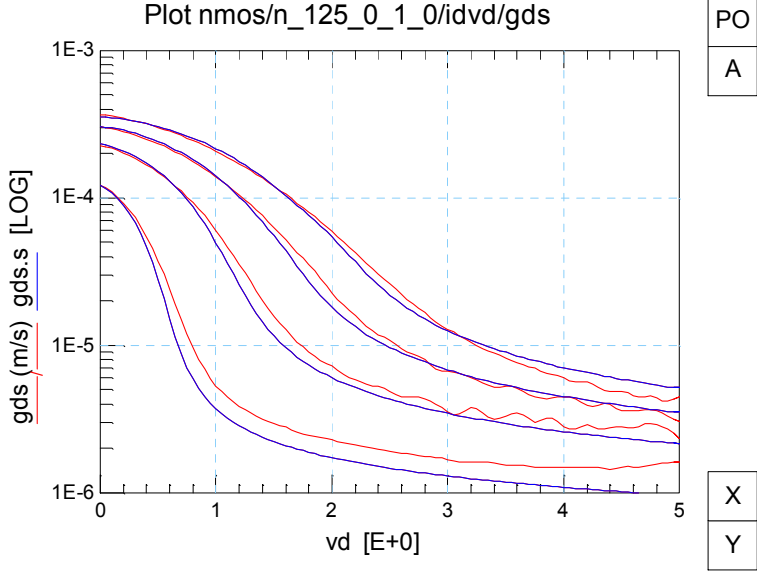
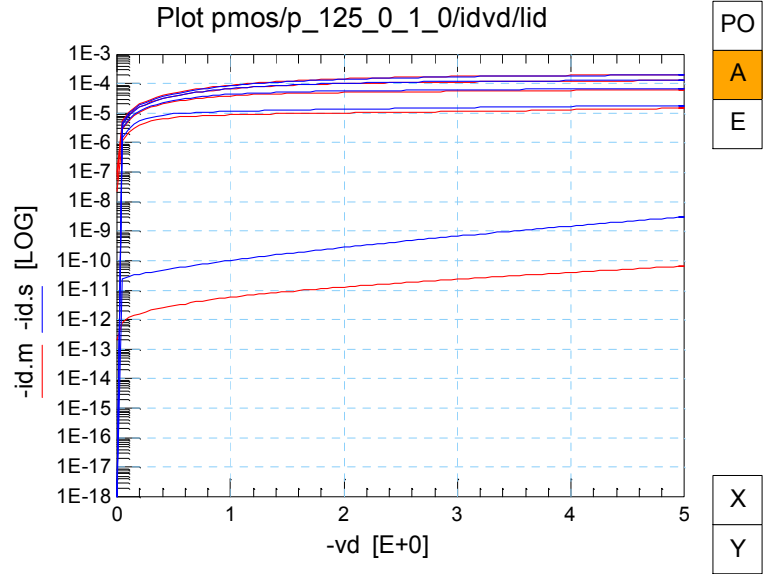
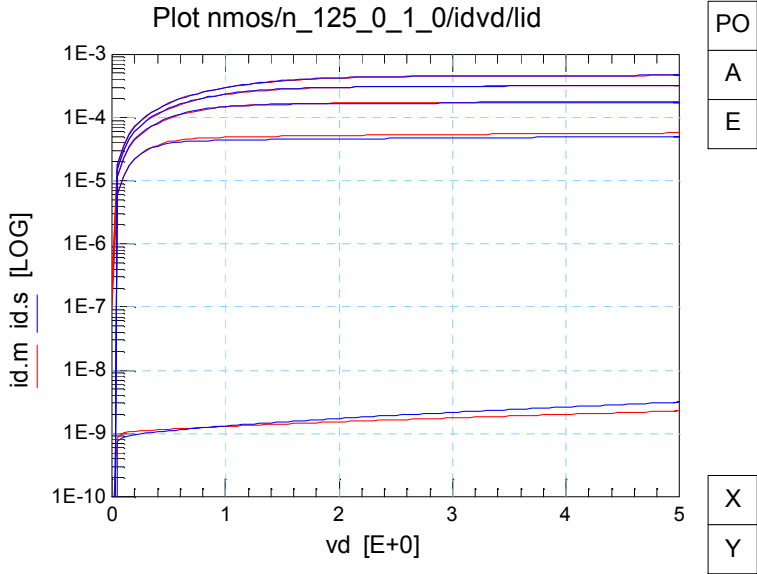
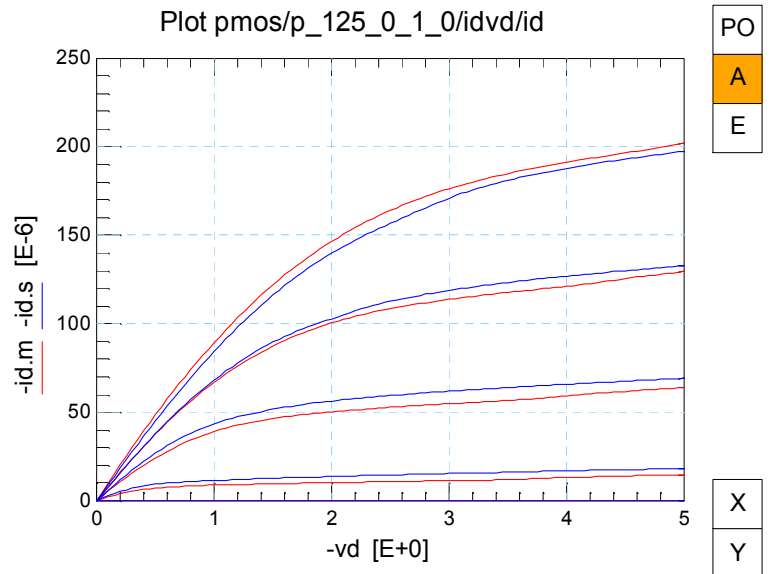
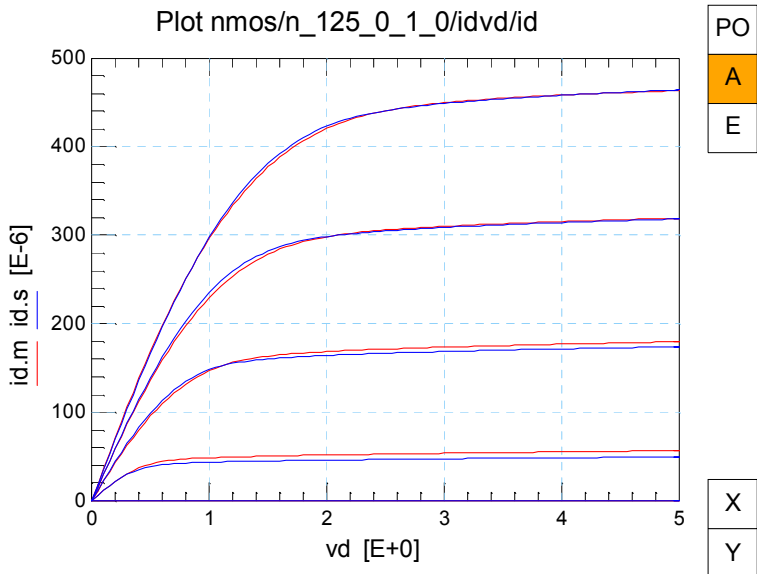


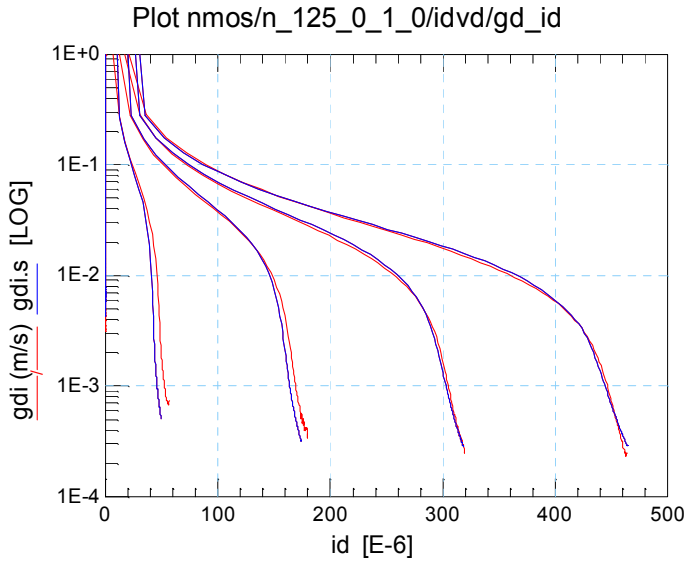
PO
A
E

X
Y



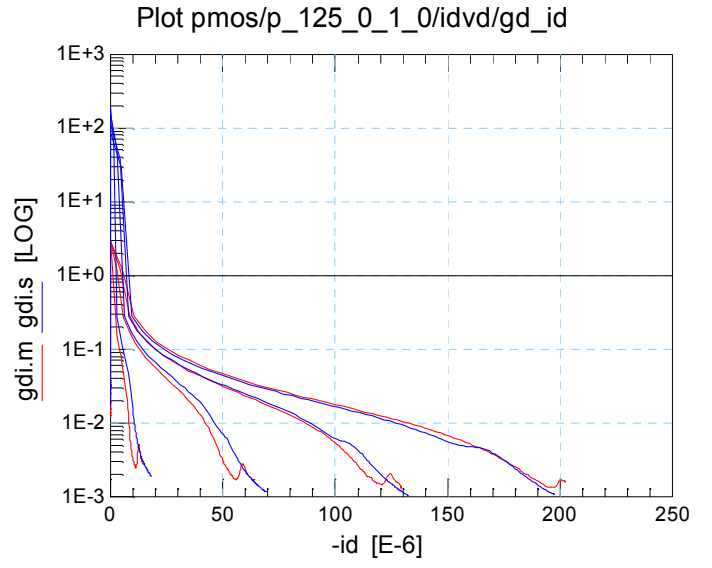






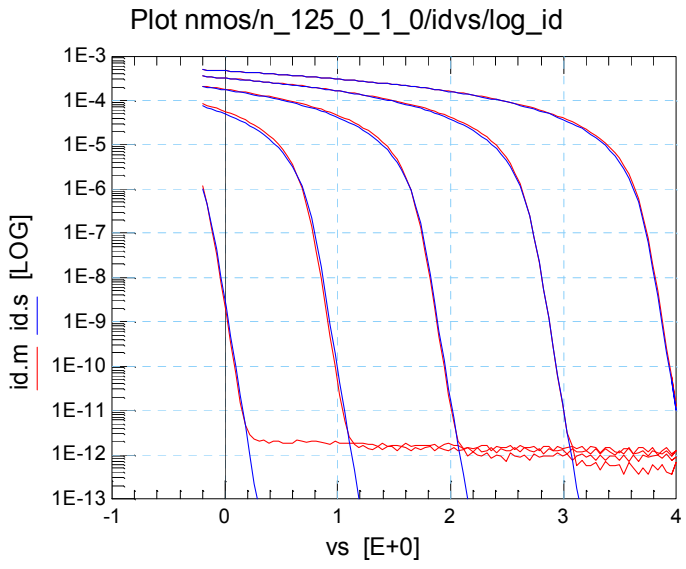
PO
A

X
Y



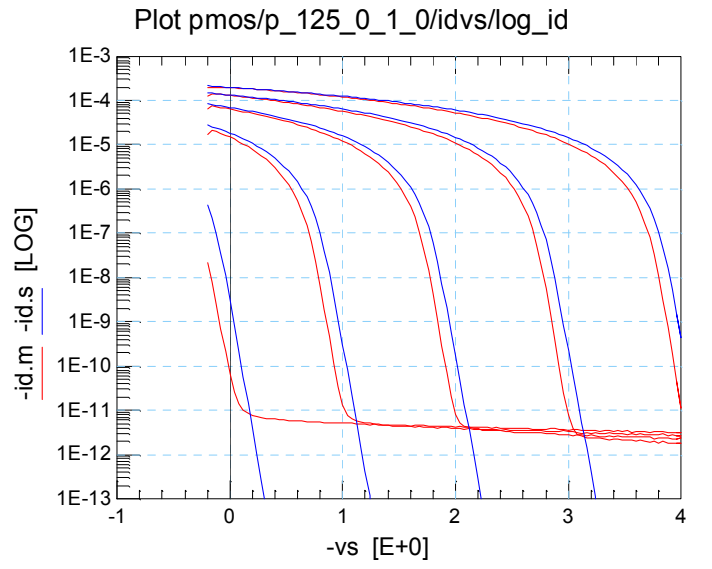
PO
A
E

X
Y



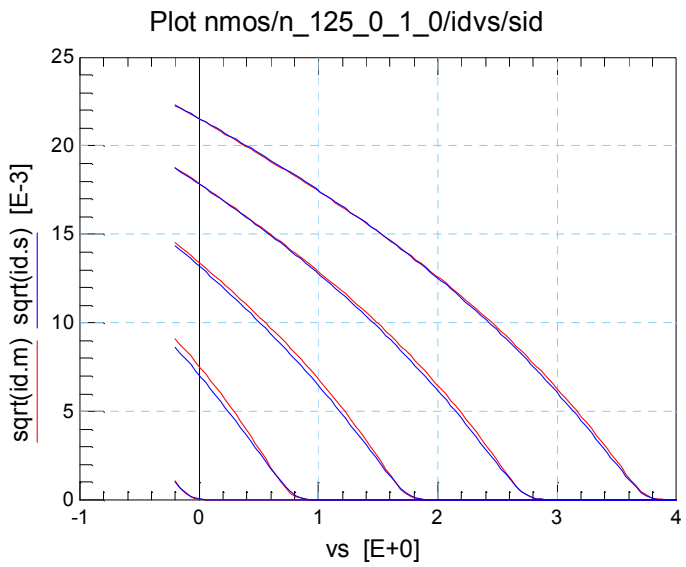
PO
A
E

X
Y



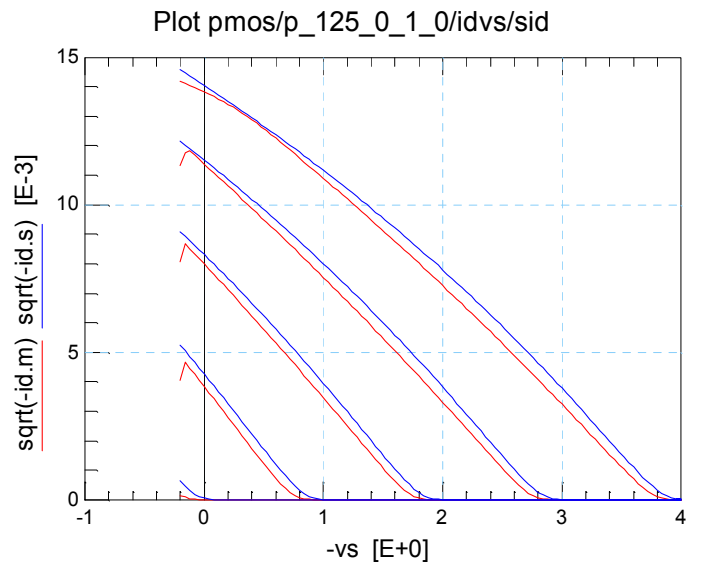
PO
A
E

X
Y



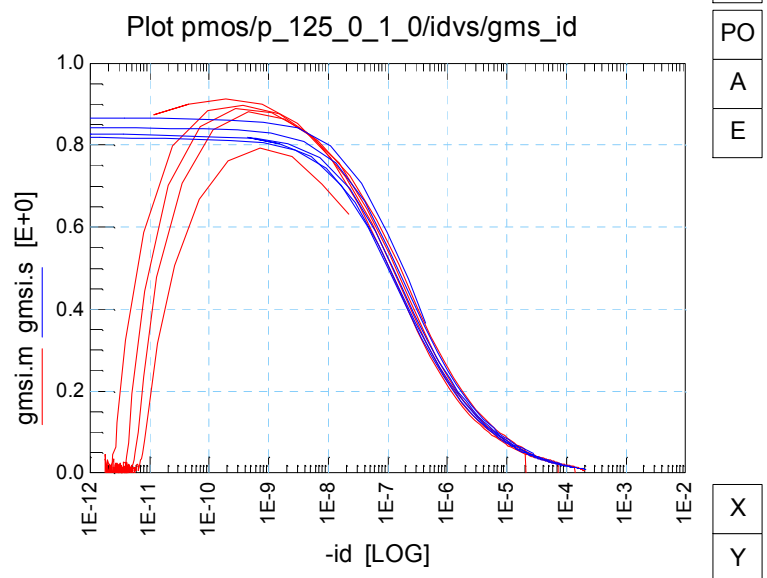
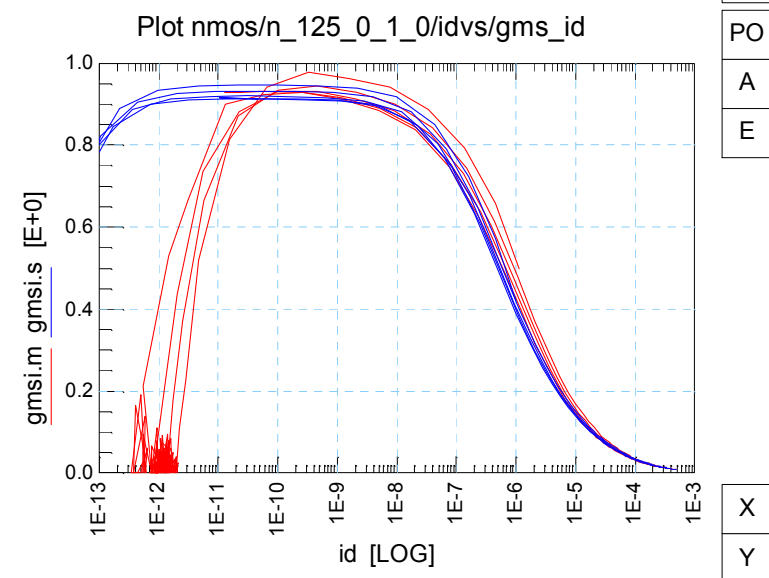
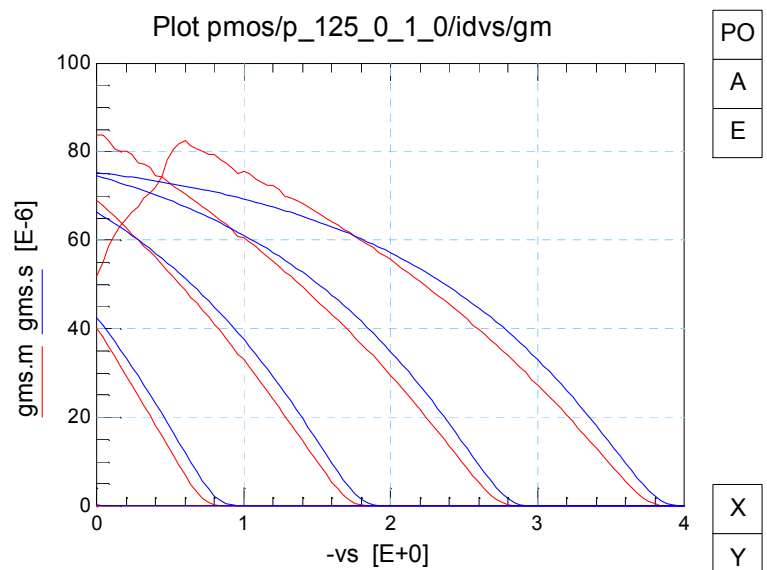
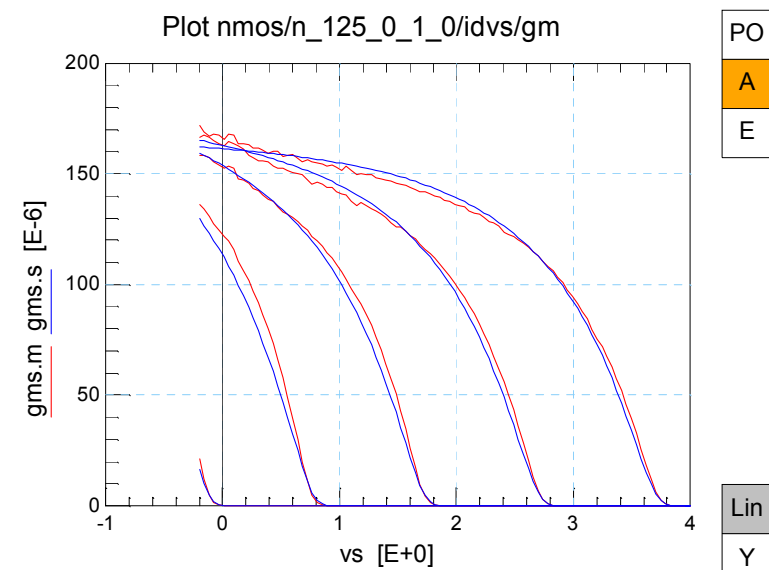
PO
A
E

X
Y



PO
A
E

X
Y



Για να γίνει η προσομοίωση αυτή, εισήχθησαν τιμές στις παραμέτρους του EKV μοντέλου. Οι τιμές αυτές προσαρμόστηκαν έτσι ώστε όλες από κοινού οι προσομοιώσεις να έχουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε όλες τις γεωμετρίες. Η λίστα των παραμέτρων (parameter set) για την τεχνολογία 1um τόσο για NMOS όσο και για PMOS, παρατίθενται παρακάτω :

Parameter set for 1um

	NMOS	PMOS
COX	1.725m	1.725m
XJ	50.00n	20.00n
VTO	550.0m	-670.0m
PHIF	380.0m	550.0m
GAMMA	670.0m	610.0m
GAMMAG	25	14.00
KP	106.0u	35.00u
E0	400.0MEG	212.0MEG
E1	128.0MEG	109.0MEG
ETA	500.0m	600.0m
DL	-420.0n	-250.0n
DW	-15.00n	0.000
UCRIT	1.600MEG	5.000MEG
LAMBDA	280.0m	1.300
DELTA	1.750	1.650
ACLM	0.83	0.83
LR	50.0E-9	250.0n
QLR	110.0u	300.0u
NLR	0.000	9.000m
LETA	355.0m	1.450
WETA	720.0m	1.000
ETAD	670.0m	950.0m
SIGMAD	1.0	1.0
WR	180.0n	80.00n
QWR	-200.0u	470.0u
NWR	5.0m	5.500m
DDITS	0.3	0.3
LQWR	0.0	0.0
LNWR	0.0	0.0
LWR	0.0	0.0
WQLR	5.100u	3.500u
WNLR	0.0	0.0
WLR	0.0	0.0
WUCRIT	50.00n	10.00n
WLAMBDA	0.0	0.0
WETAD	-200.0n	50.00n
WE0	0.0	0.0
WE1	300.0n	100.0n
WRLX	-500.0n	0.0
RLX	1.320m	2.050m

Όλες οι υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων είναι ίσες με τις default τιμές, όπως αυτές αναφέρονται στο Παράρτημα Ι.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

Extended validation of EKV3 compact mode for a 0.25um CMOS technology

Τα setup που έγιναν για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τεχνολογία 0.25um σε NMOS και σε PMOS είναι :

Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

Το setup για τις μετρήσεις id-vg που έγιναν είναι :

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

$$V_g = 0\text{V} - 2.5\text{V step } 50\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - -1.2\text{V step } -300\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις id-vs που έγιναν είναι :

$$V_d = 2.5\text{V}$$

$$V_g = 500\text{mV} - 2.5\text{V step } 500\text{mV}$$

$$V_s = 0\text{V} - 2.5\text{V step } 50\text{mV}$$

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

Το setup για τις μετρήσεις id-vd που έγιναν είναι :

$$V_d = 0\text{V} - 2.5\text{V step } 50\text{mV}$$

$$V_g = 500\text{mV} - 2.5\text{V step } 500\text{mV}$$

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

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

Για τα τρανζίστορ τύπου P (PMOS)

Το setup για τις μετρήσεις id-vg που έγιναν είναι :

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

$$V_g = 0\text{V} - -2.5\text{V step } -50\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - 1.2\text{V step } 300\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις id-vs που έγιναν είναι :

$$V_d = -2.5\text{V}$$

$V_g = -500\text{mV} - 2.5\text{V step } -500\text{mV}$

$V_s = 0\text{V} - 2.5\text{V step } -50\text{mV}$

$V_b = 0\text{V}$

To setup για τις μετρήσεις i_d - v_d που έγιναν είναι :

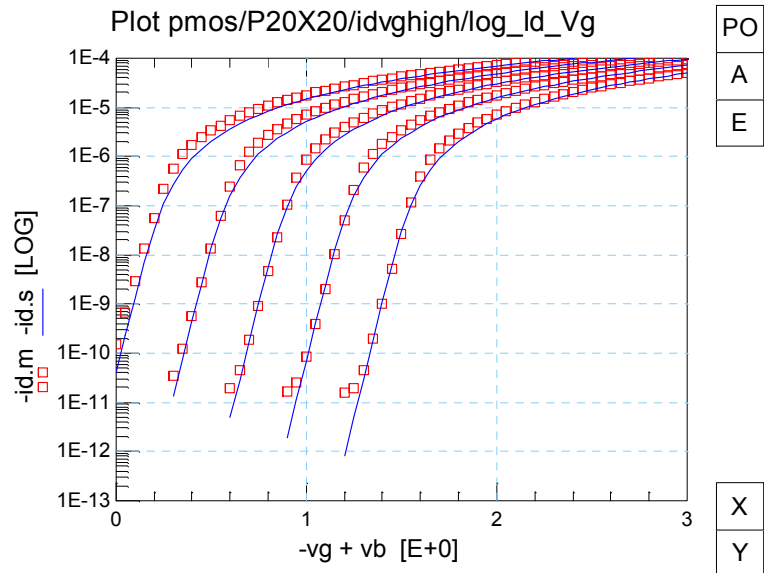
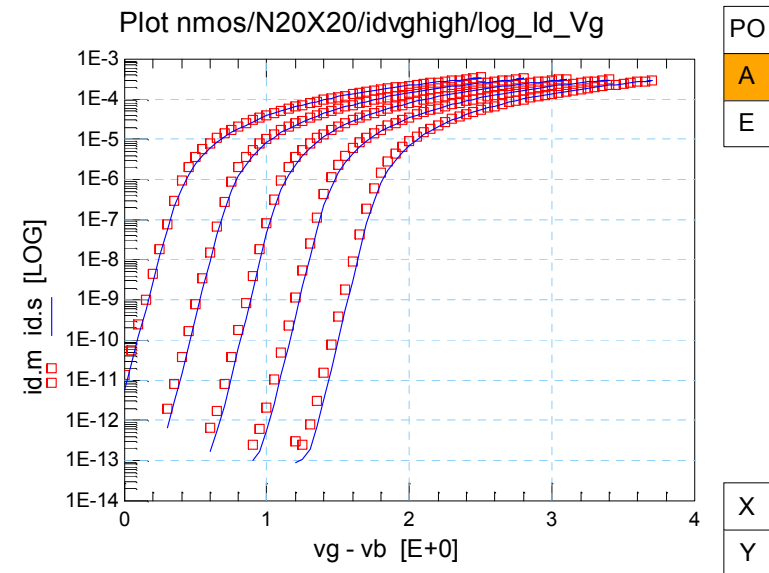
$V_d = 0\text{V} - 2.5\text{V step } -50\text{mV}$

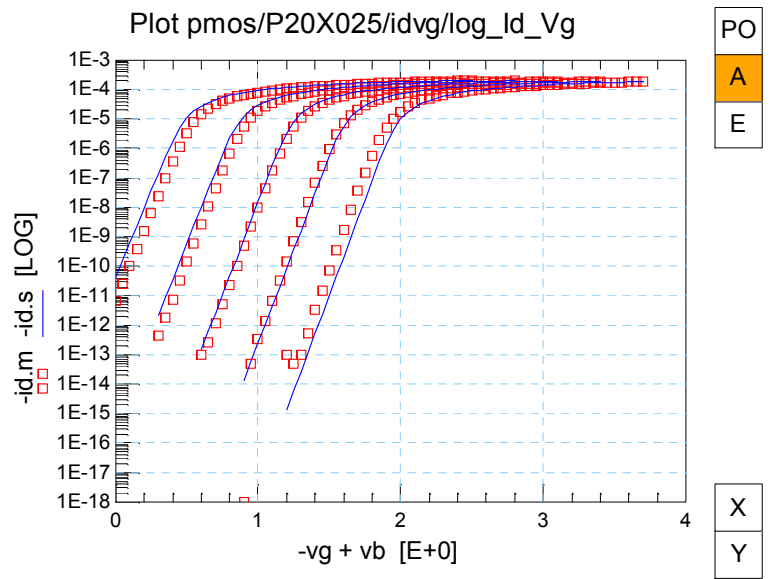
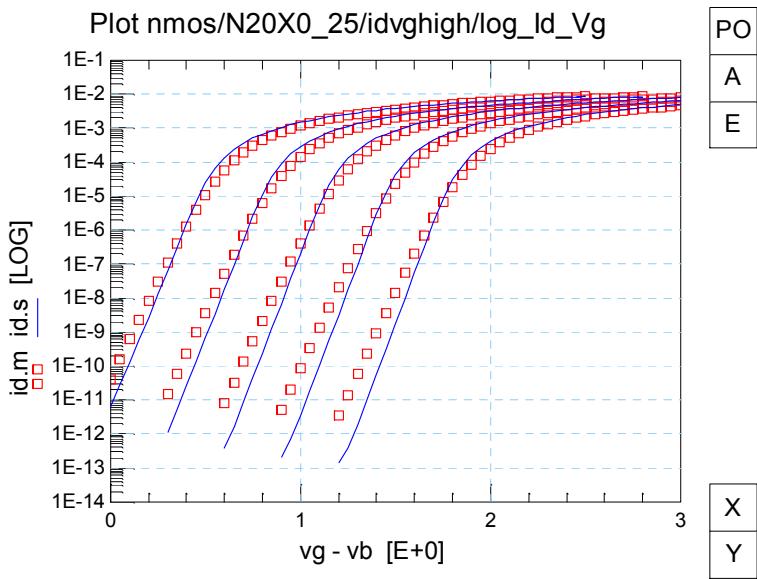
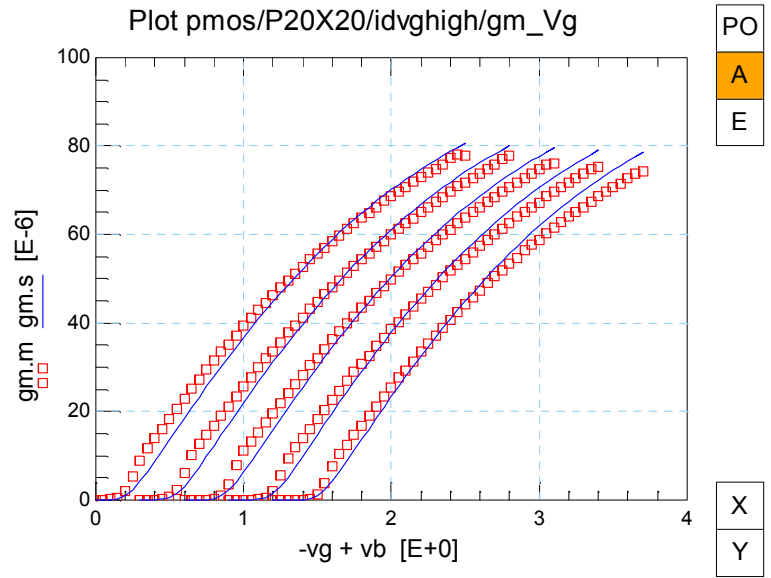
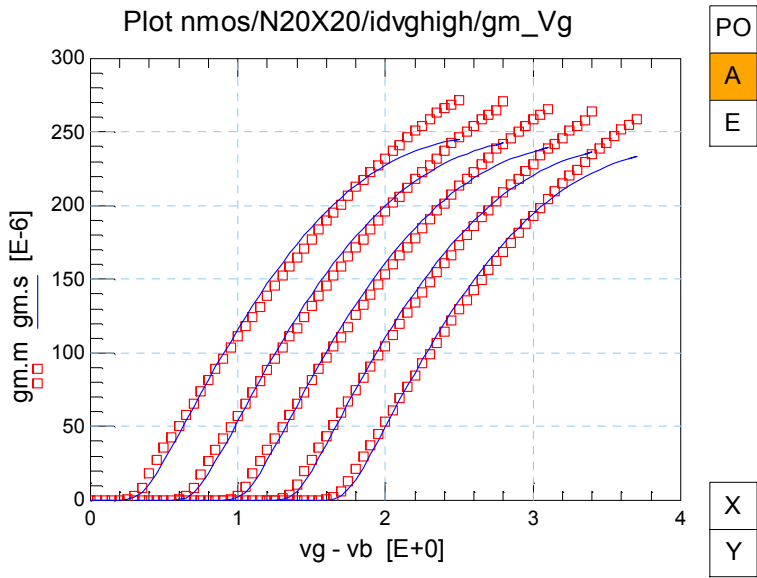
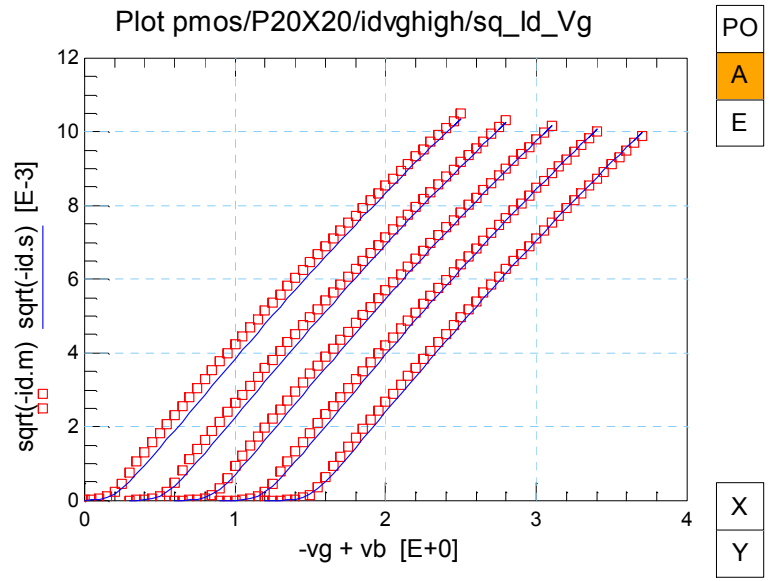
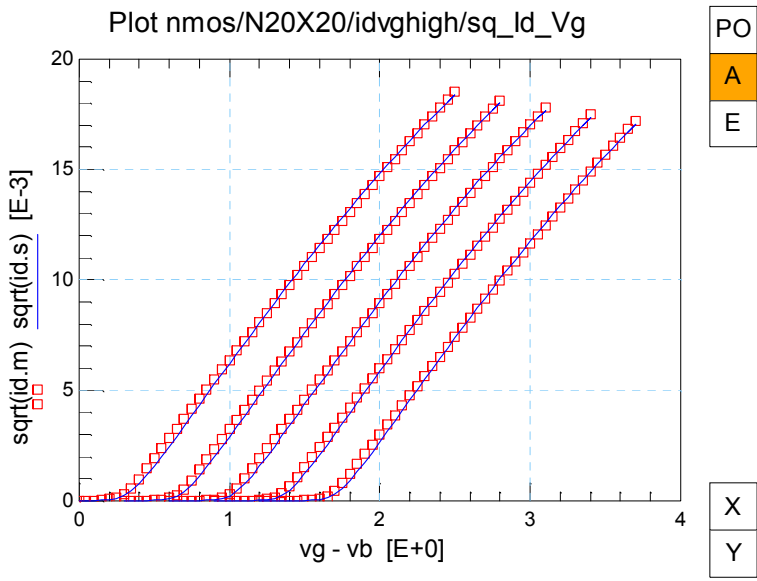
$V_g = -500\text{mV} - 2.5\text{V step } -500\text{mV}$

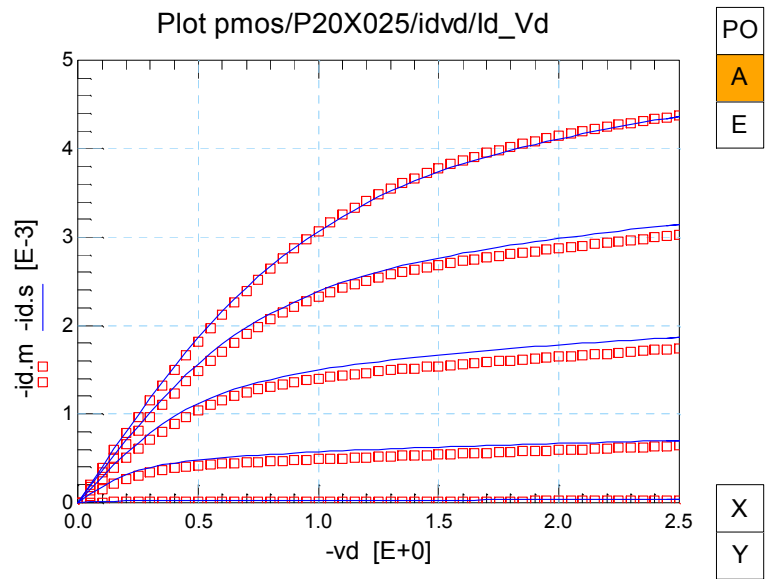
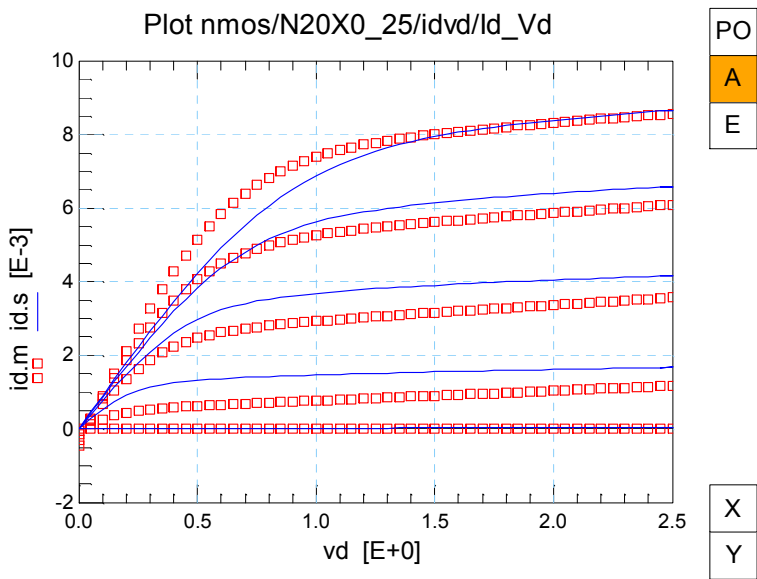
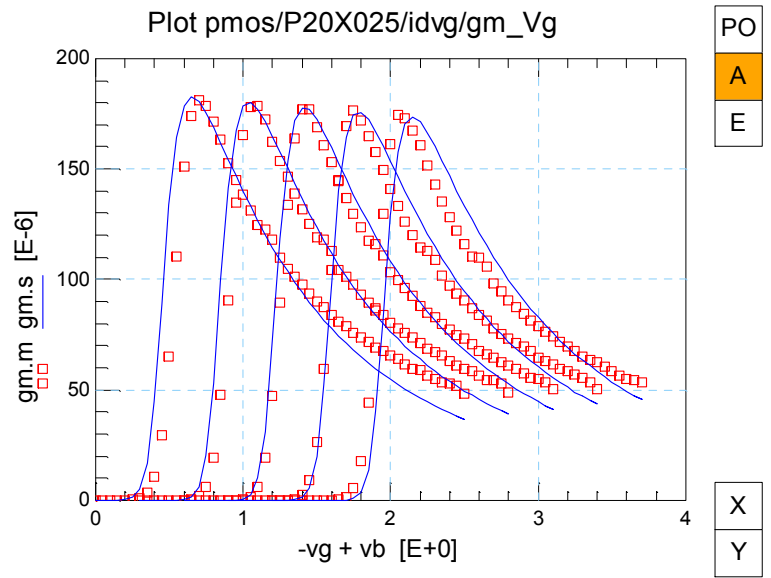
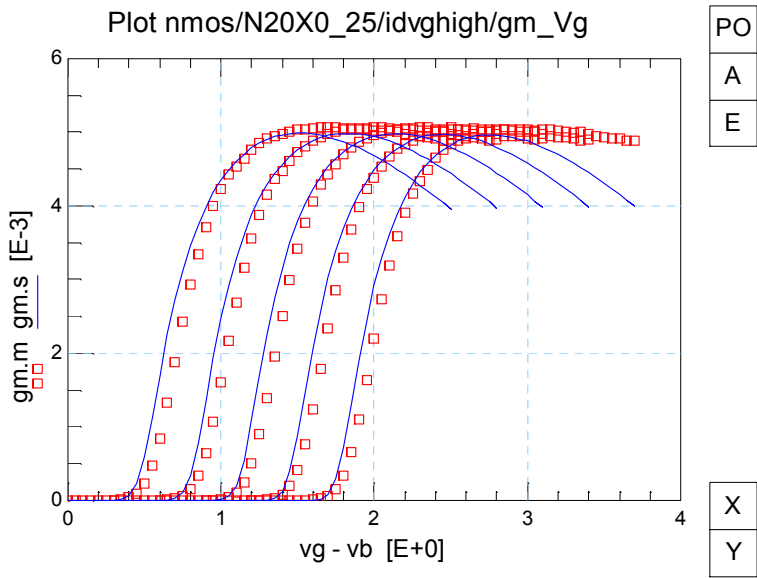
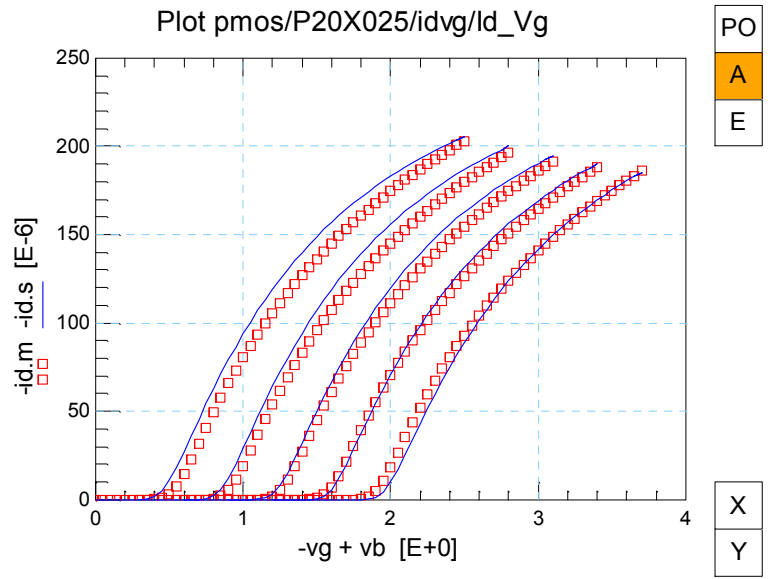
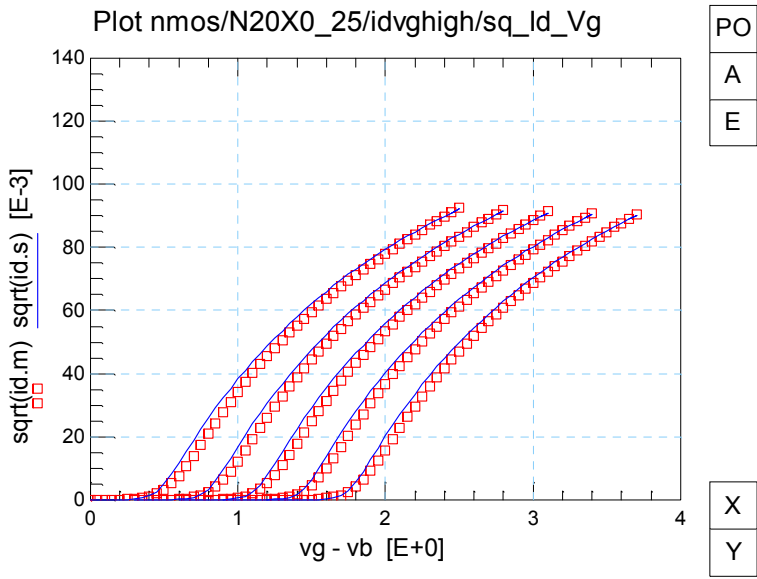
$V_s = 0\text{V}$

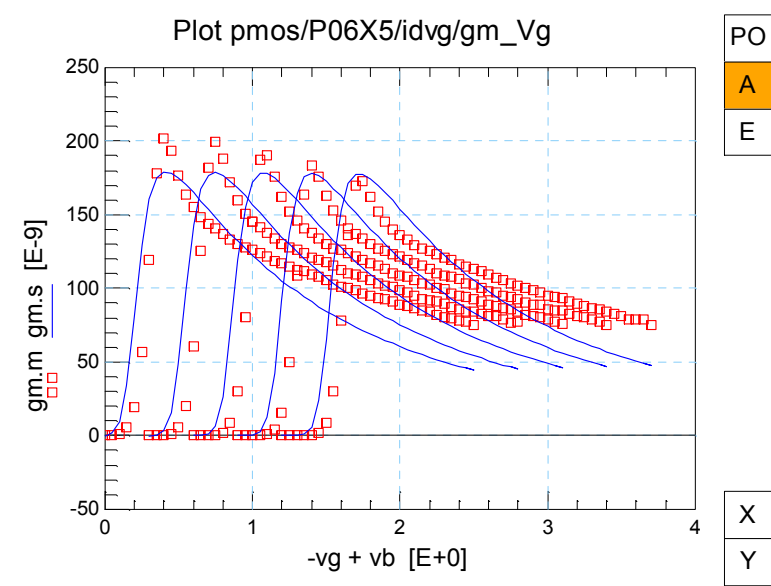
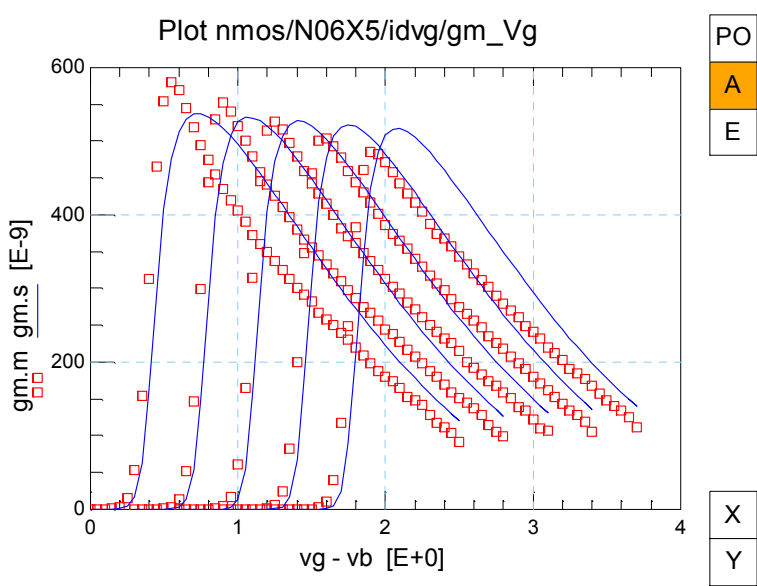
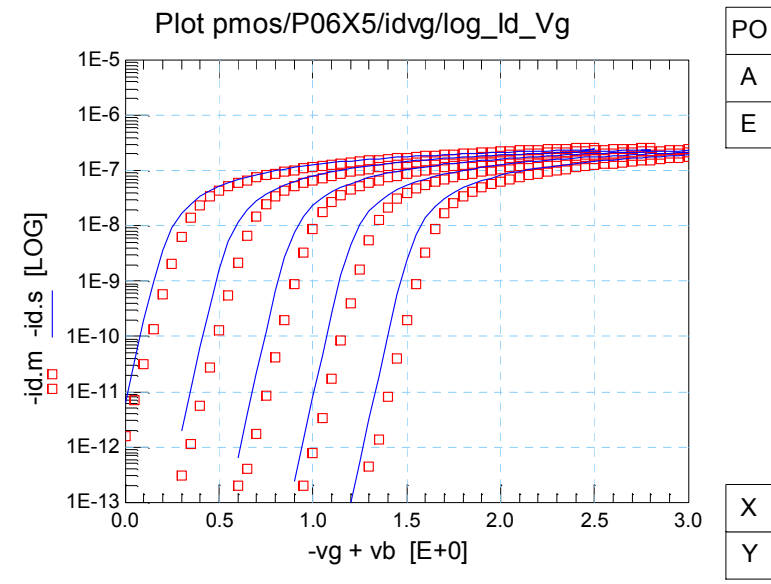
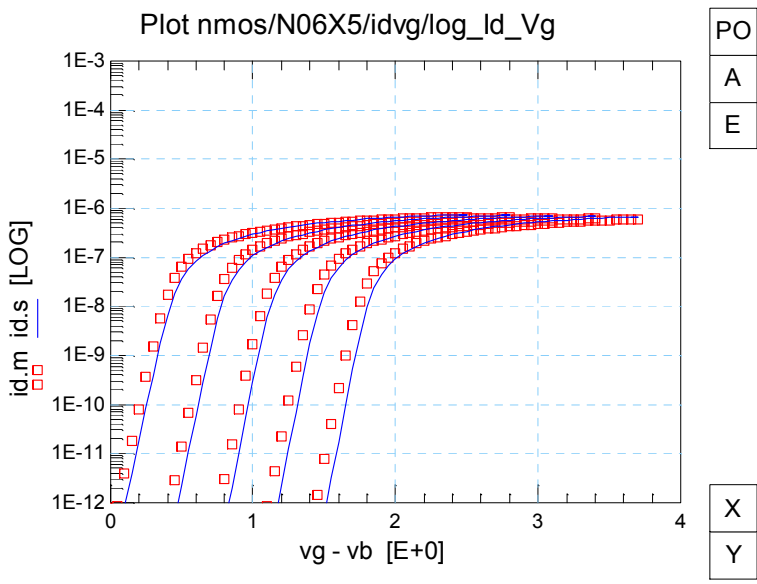
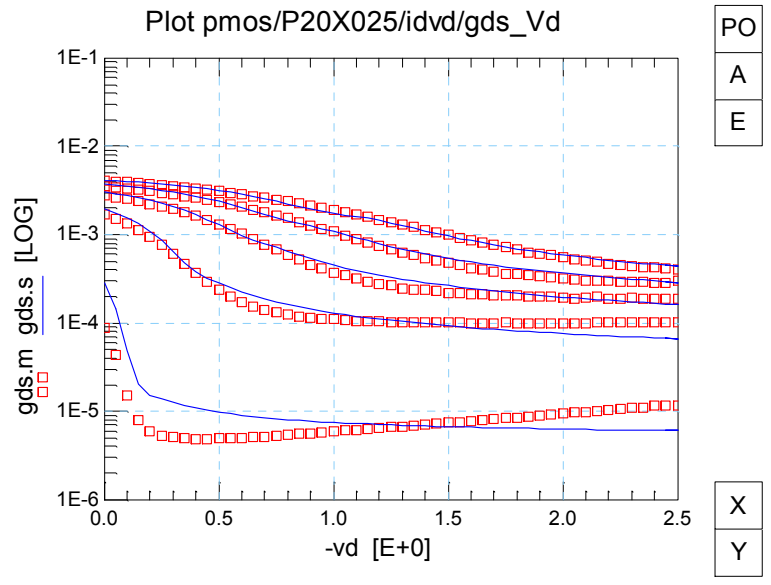
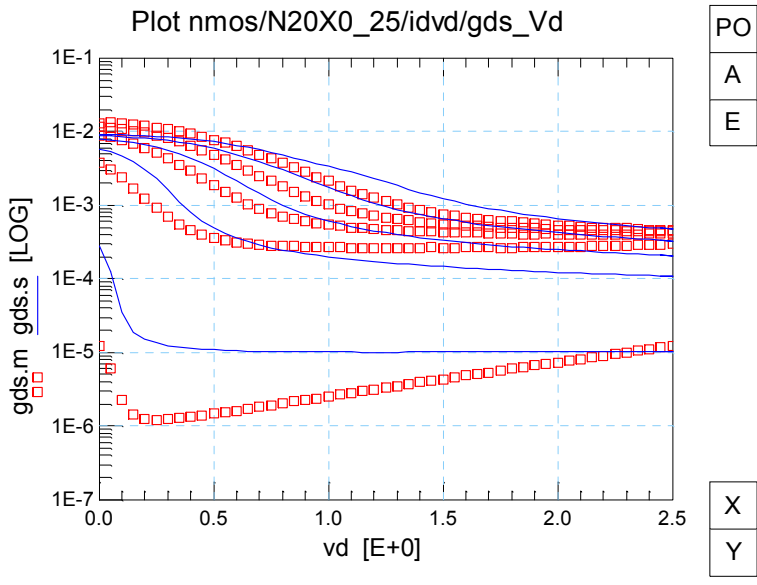
$V_b = 0\text{V}$

Προσομοιώνοντας τις πειραματικές μετρήσεις με το EKV3 μοντέλο, έχουμε τις εξής χαρακτηριστικές :

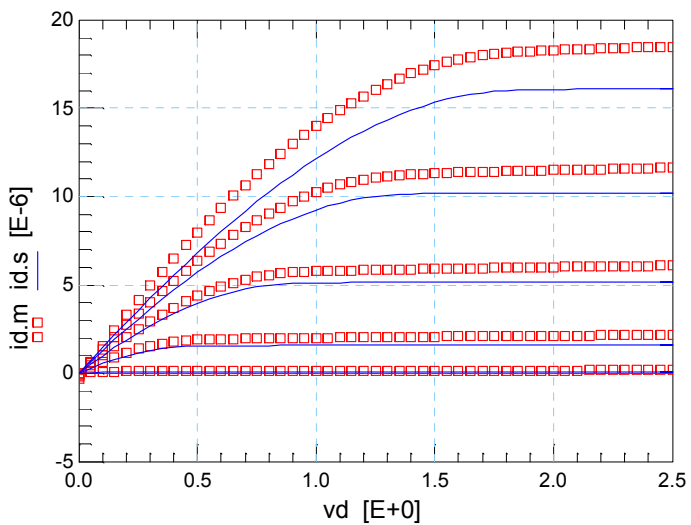








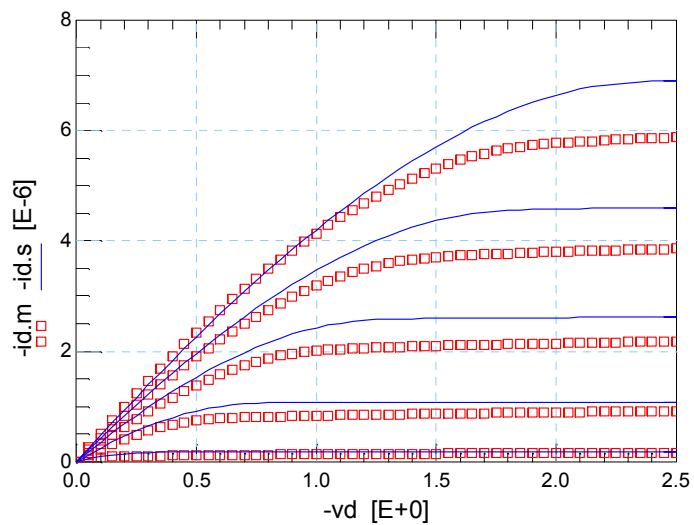
Plot nmos/N06X5/idvd/Id_Vd



PO
A
E

X
Y

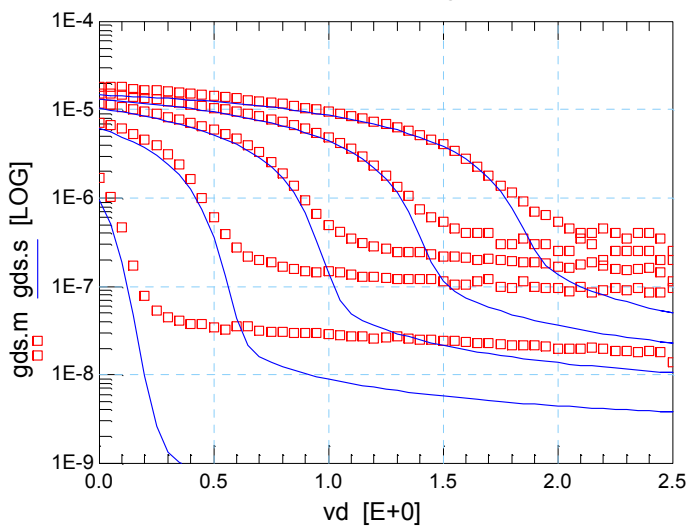
Plot pmos/P06X5/idvd/Id_Vd



PO
A
E

X
Y

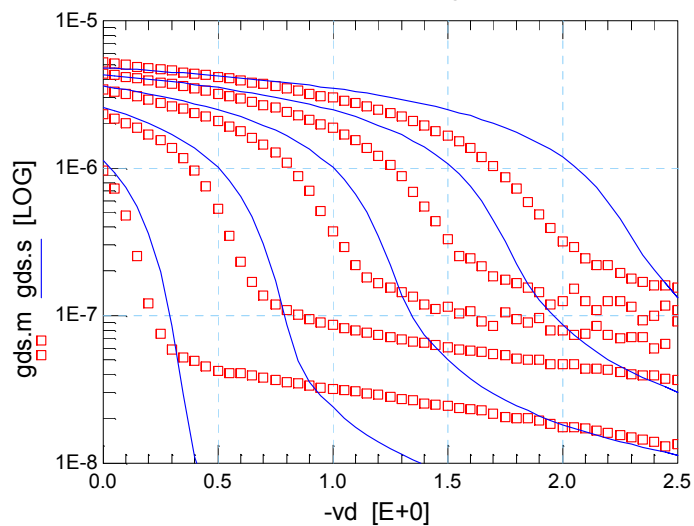
Plot nmos/N06X5/idvd/gds_Vd



PO
A
E

X
Y

Plot pmos/P06X5/idvd/gds_Vd



PO
A
E

X
Y

Parameter set for 0.25um

	NMOS	PMOS
COX	6m	6m
XJ	50.00n	50.00n
VTO	370.0m	-220.0m
PHIF	300.0m	500.0m
GAMMA	320.0m	200.0m
GAMMAG	25	25
KP	280.0u	70.00u
E0	1.350G	400.0MEG
E1	120.0MEG	250.0MEG
ETA	700.0m	800.0m
DL	-60.0n	-20.0n
DW	-290.00n	-210.0n
UCRIT	1.800MEG	4.400MEG
LAMBDA	350.0m	850m
DELTA	1.650	1.950
ACLM	0.83	0.83
LR	65.0n	65.0n
QLR	1.2m	2.5m
NLR	0.000	160m
LETA	600.0m	400m
WETA	60.0m	600m
ETAD	200.0m	370.0m
SIGMAD	1.0	1.0
WR	120.0n	80.00n
QWR	-150.0u	470.0u
NWR	0	5.500m
DDITS	0.3	0.3
LQWR	0.0	0.0
LNWR	0.0	0.0
LWR	0.0	0.0
WQLR	5.400u	2.100u
WNLR	50.0n	2.0n
WLR	50.0n	1.0n
WUCRIT	420.0n	-10.00n
WLAMBDA	50.0n	20.0n
WETAD	-60.0n	2.00n
WE0	60.0n	60.0n
WE1	30.0n	190.0n
WRLX	-370.0n	5.70u
RLX	800u	1.0m

Όλες οι υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων είναι ίσες με τις default τιμές, όπως αυτές αναφέρονται στο Παράρτημα Ι.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V

Extended validation of EKV3 compact mode for a 0.15um CMOS technology

Τα setup που έγιναν για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τεχνολογία 0.11um σε NMOS και σε PMOS είναι :

Για τα τρανζίστορ τύπου N (NMOS)

Το setup για τις μετρήσεις id-vg που έγιναν είναι :

$$V_d = 100 \text{ mV}$$

$$V_g = 0\text{V} - 2\text{V step } 100\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - -1.8\text{V step } -450\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις id-vd που έγιναν είναι :

$$V_d = 0\text{V} - 200\text{mV step } 100\text{mV}$$

$$V_g = 700\text{mV} - 1.8\text{V step } 275\text{mV}$$

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

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

Για τα τρανζίστορ τύπου P (PMOS)

Το setup για τις μετρήσεις id-vg που έγιναν είναι :

$$V_d = -100 \text{ mV}$$

$$V_g = 0\text{V} - -2\text{V step } -100\text{mV}$$

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

$$V_b = 0\text{V} - 1.8\text{V step } 450\text{mV}$$

Το setup για τις μετρήσεις id-vd που έγιναν είναι :

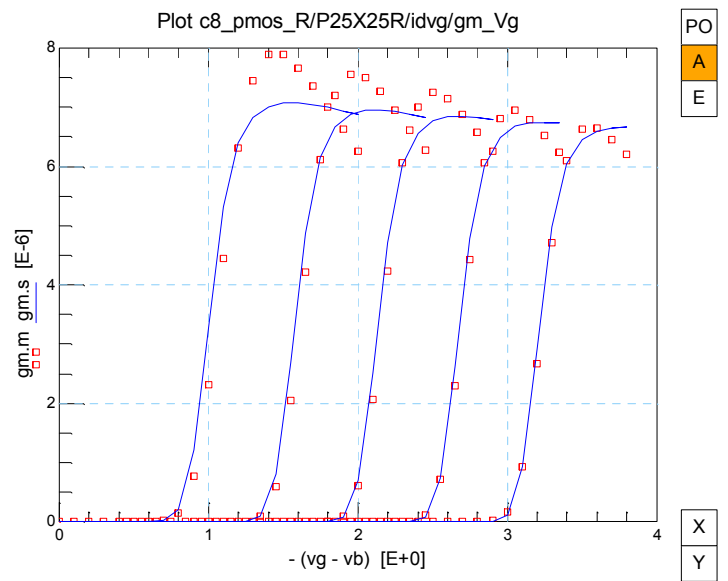
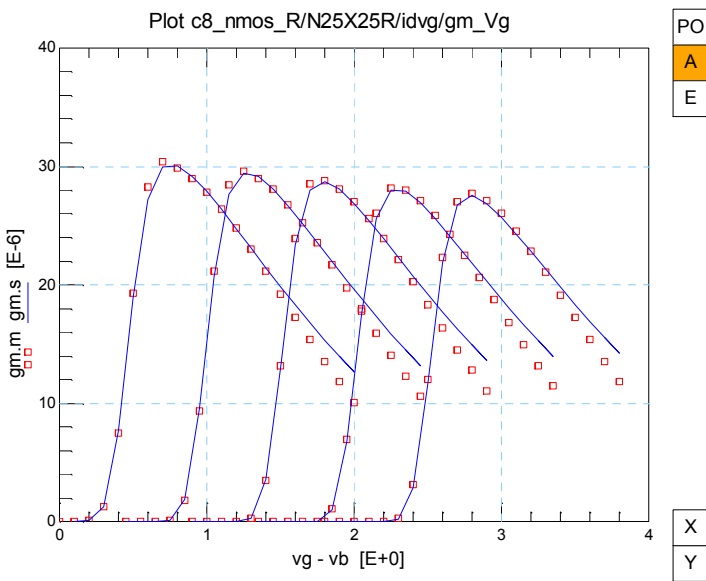
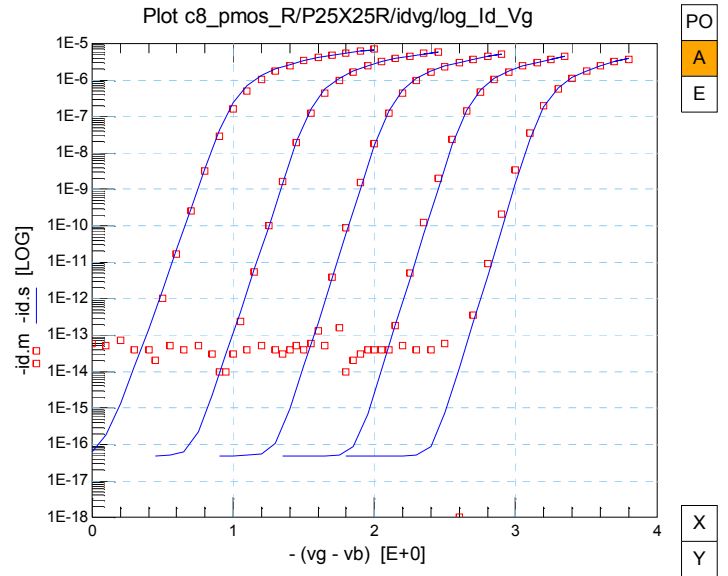
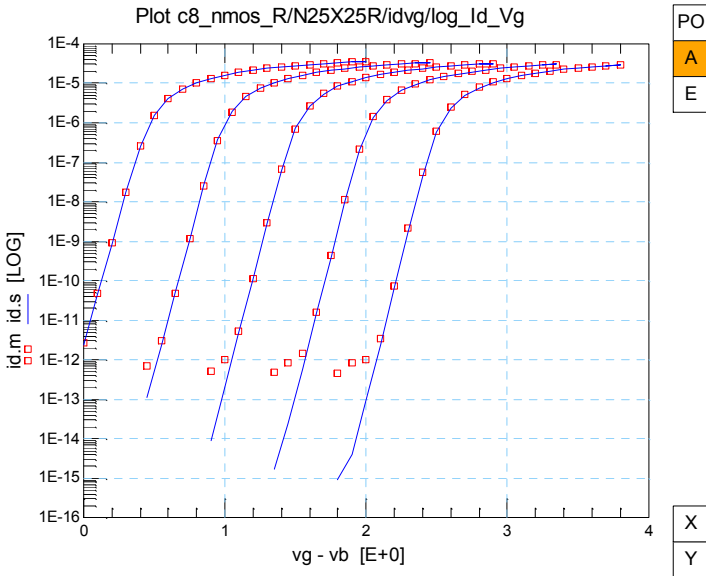
$$V_d = 0\text{V} - -2\text{V step } -100\text{mV}$$

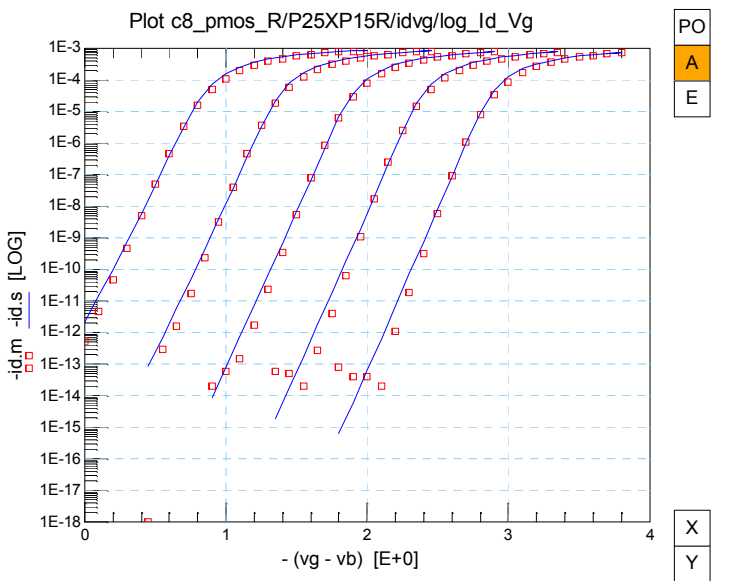
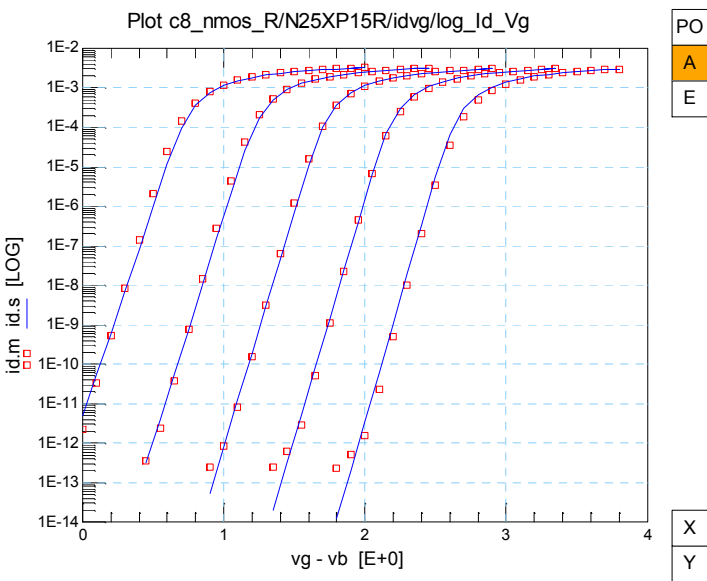
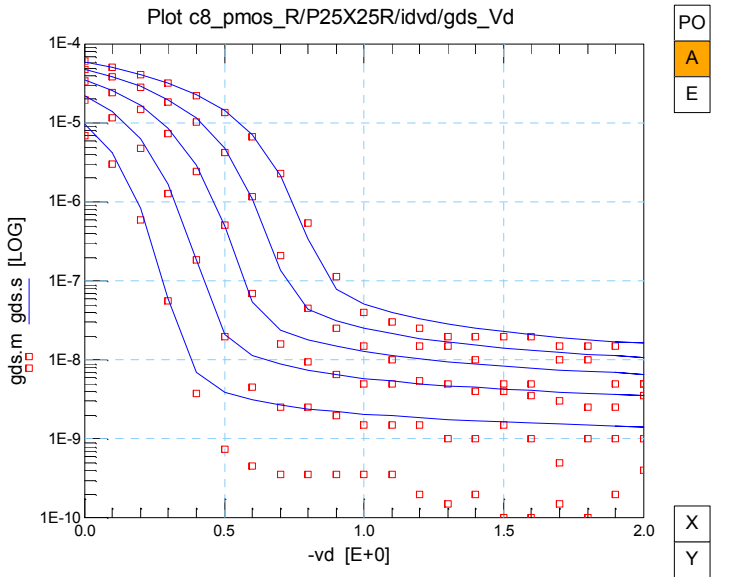
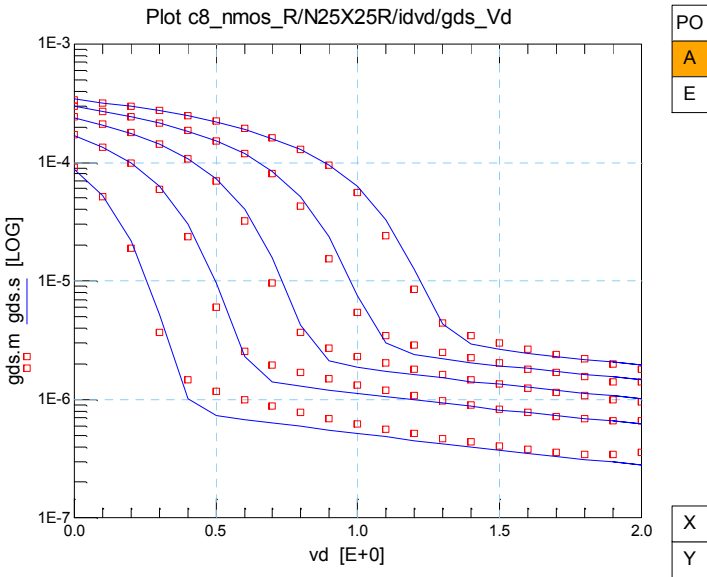
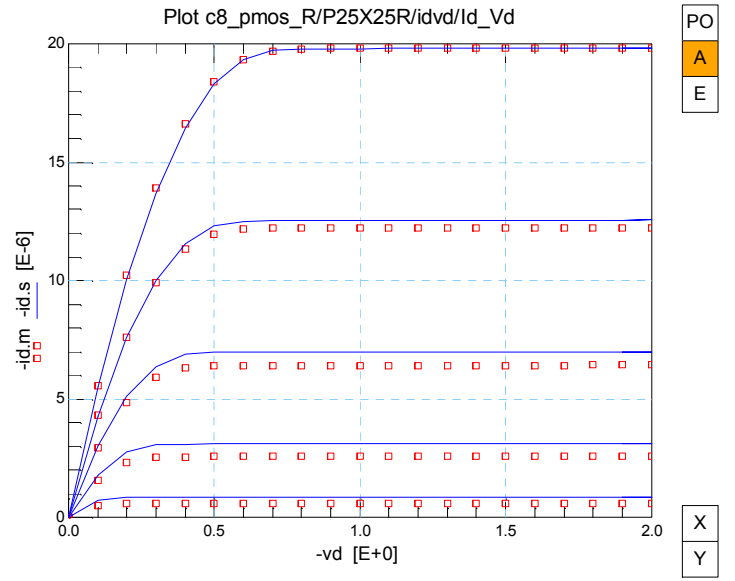
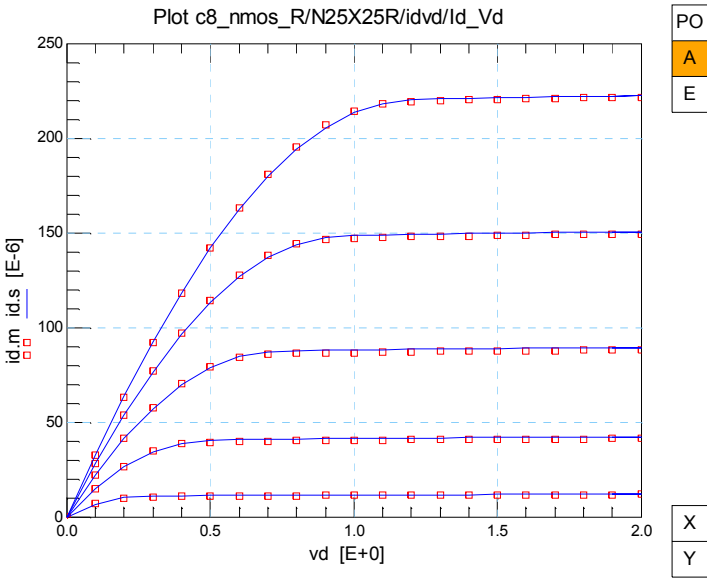
$$V_g = -1.1\text{V} - -1.8\text{V step } -175\text{mV}$$

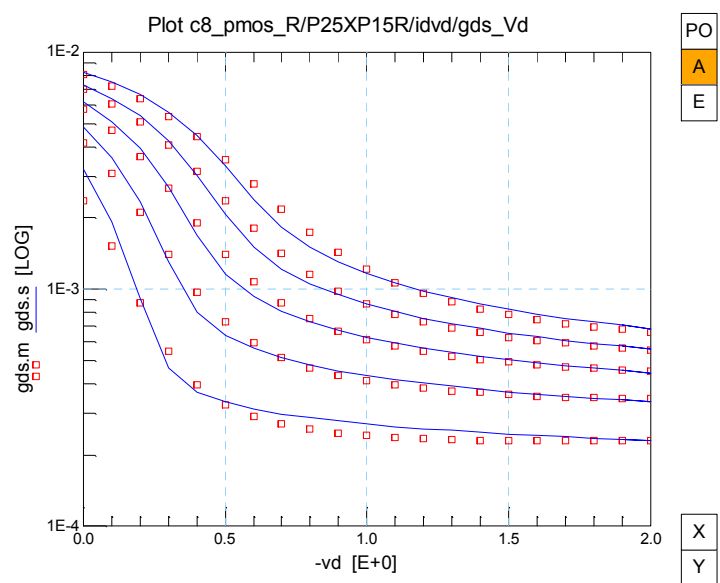
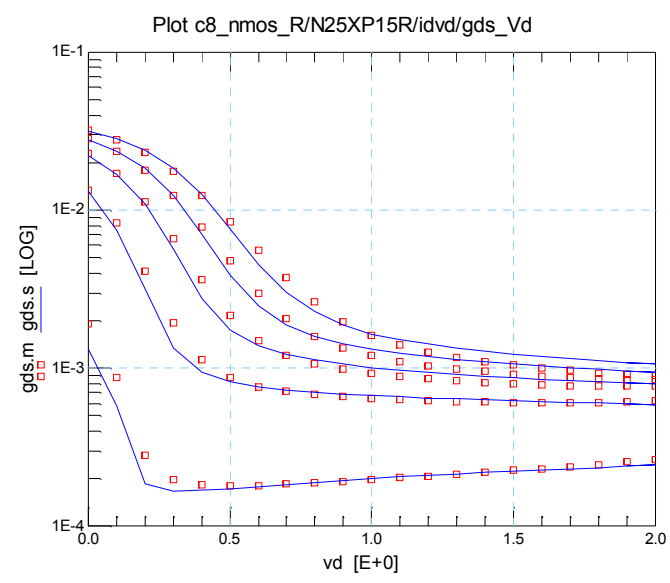
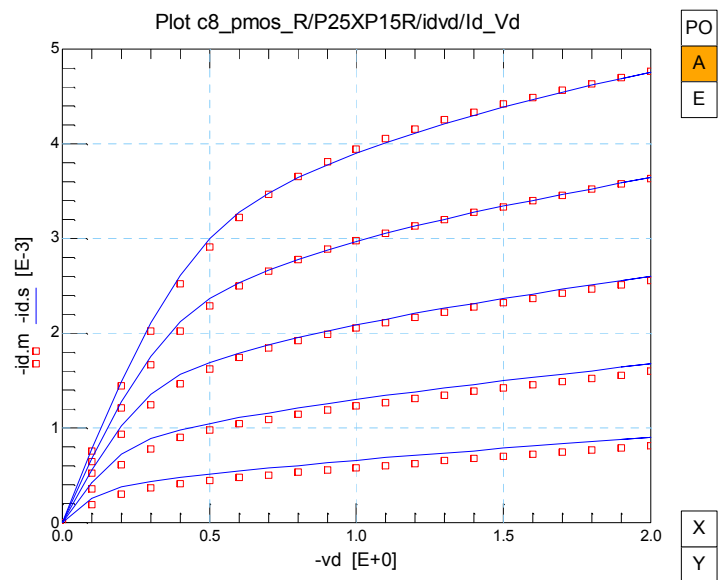
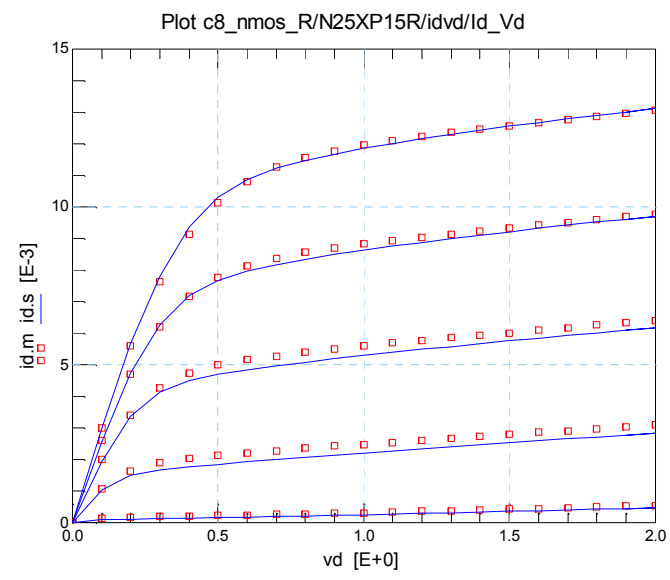
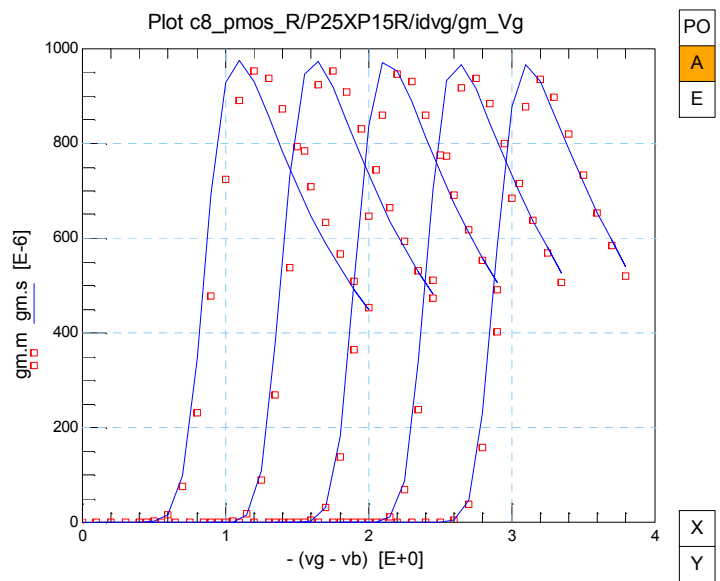
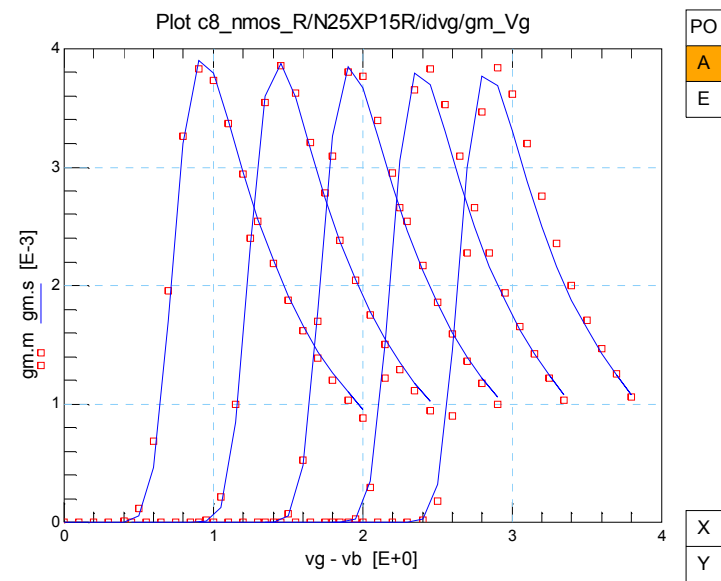
$$V_s = 0\text{V}$$

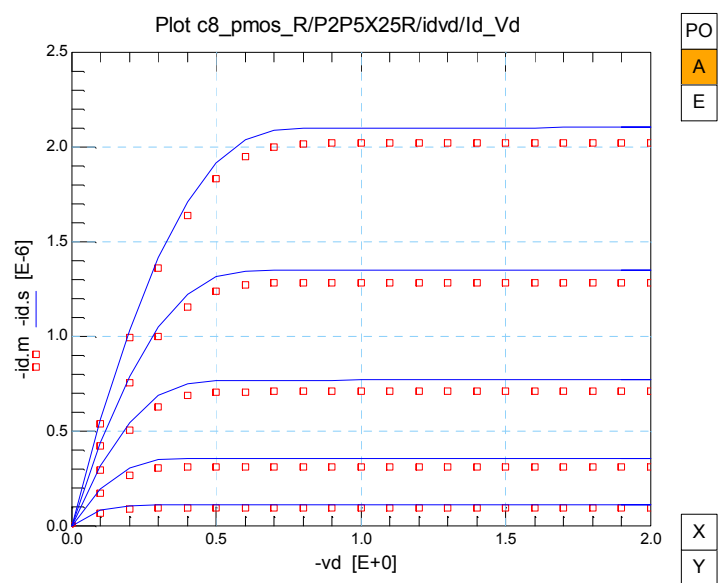
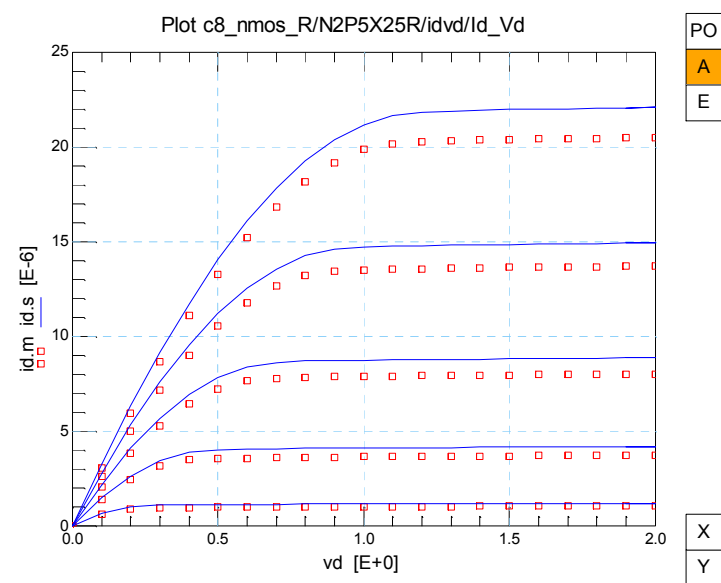
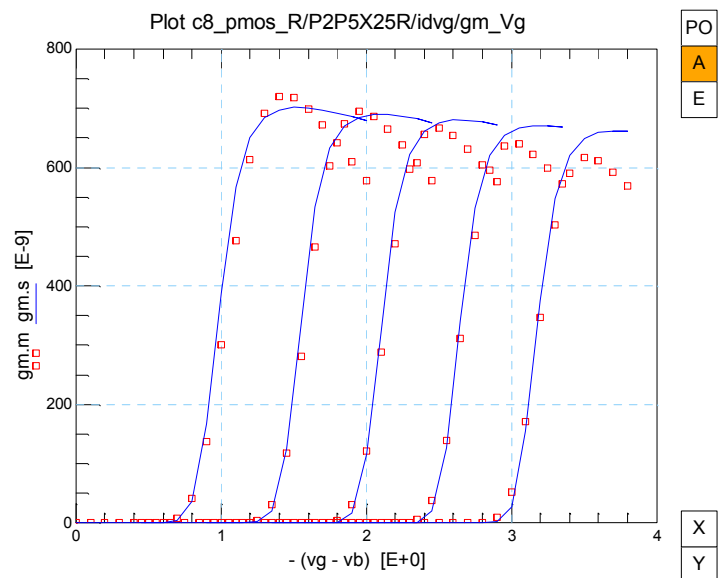
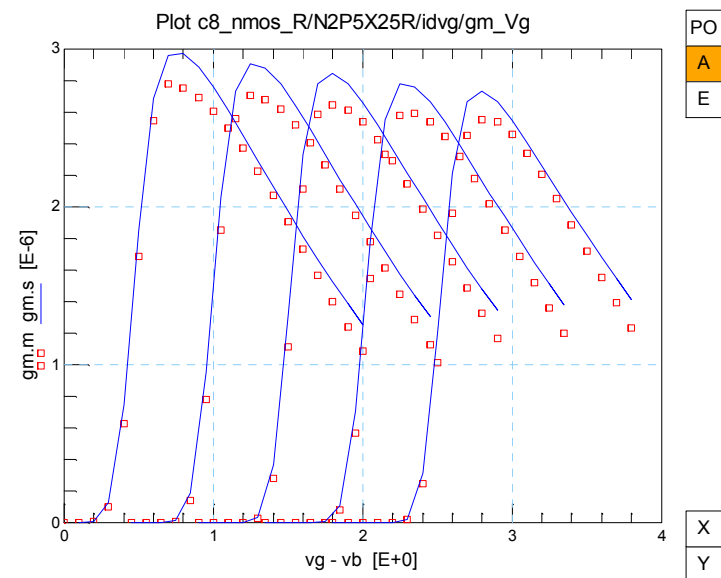
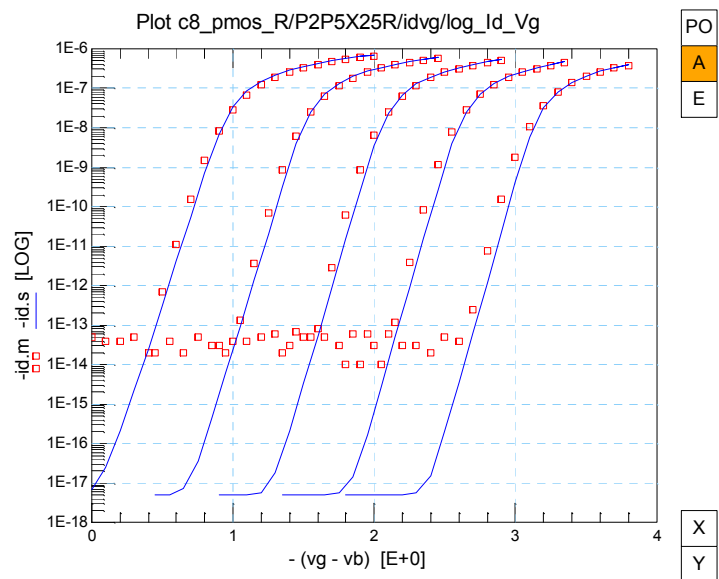
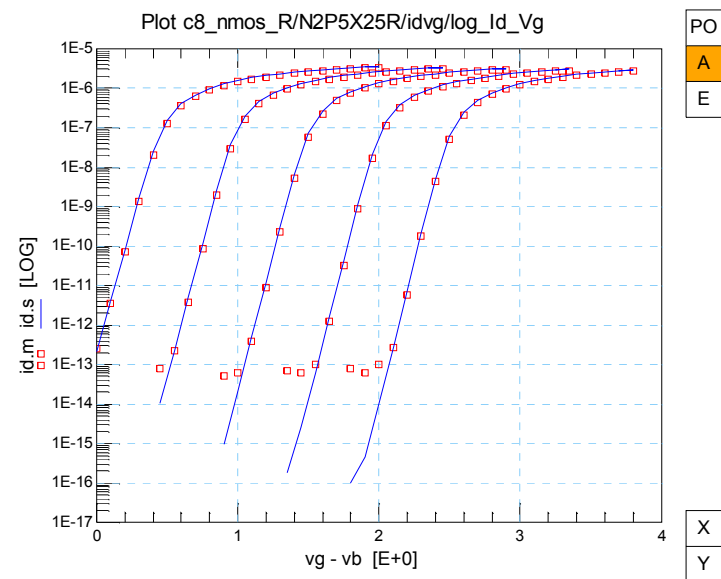
$$V_b = 0\text{V}$$

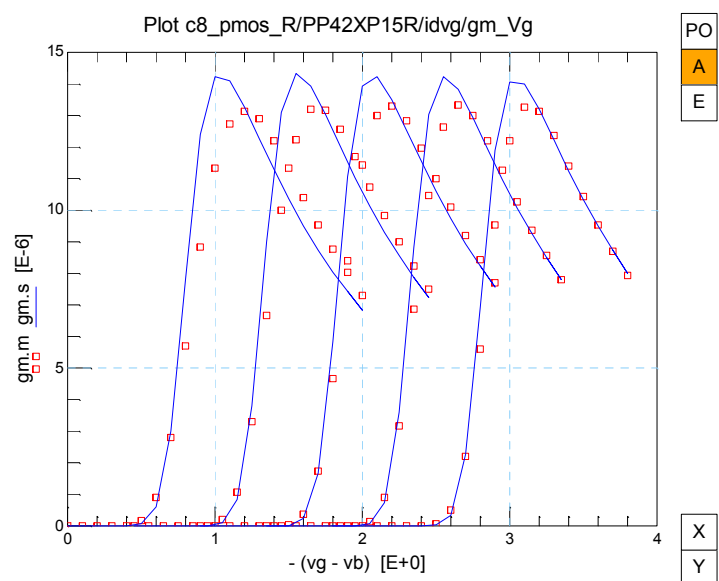
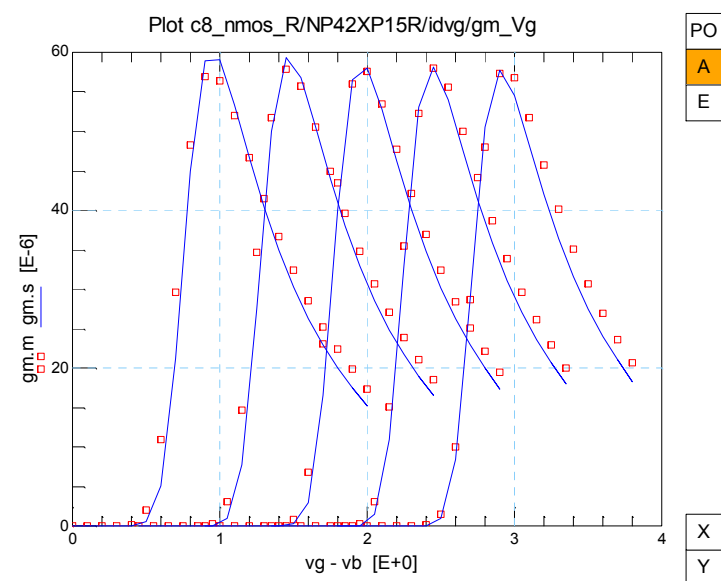
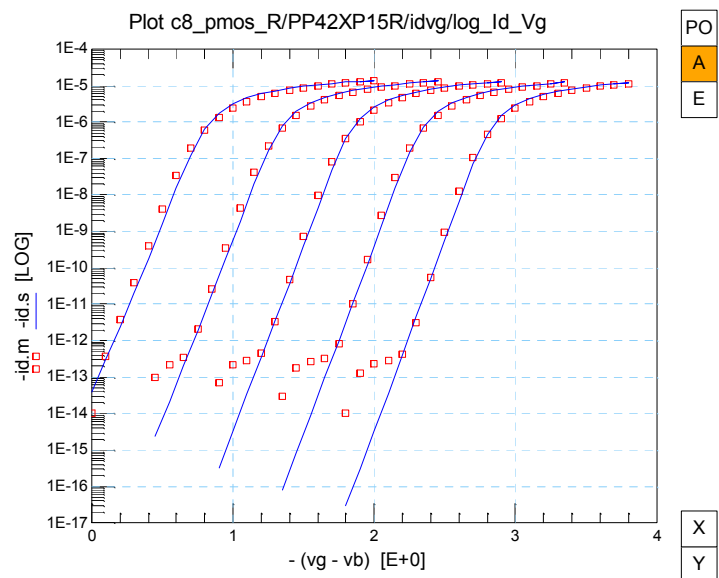
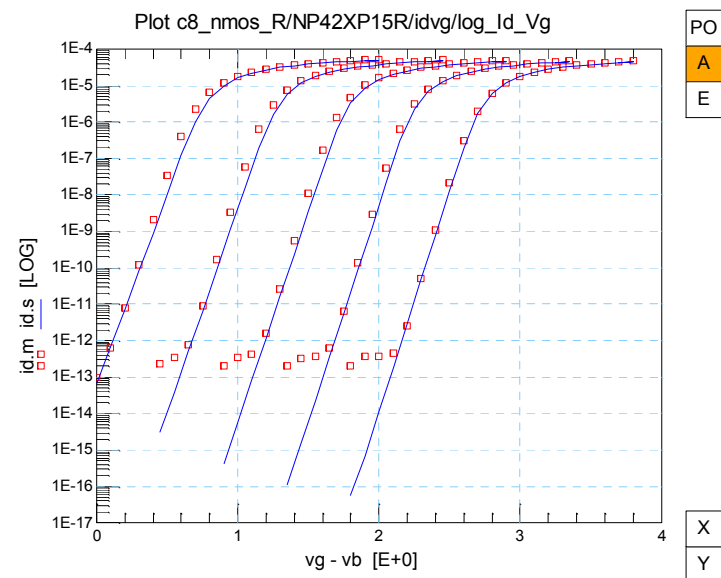
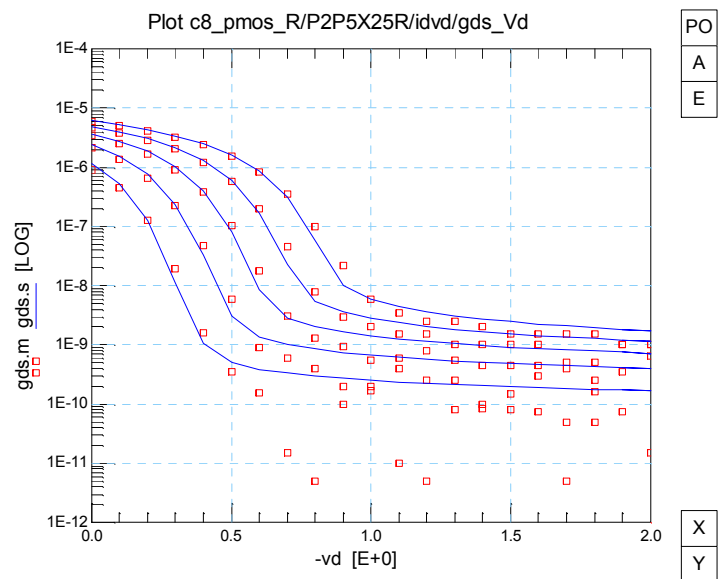
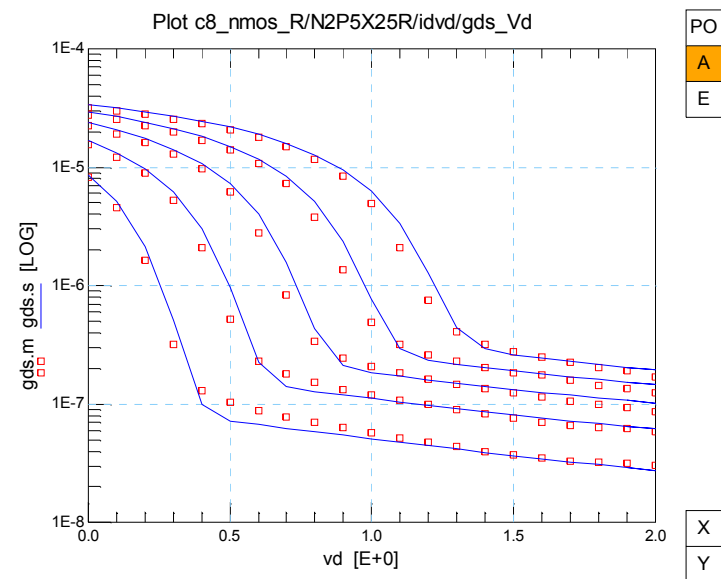
Προσομοιώνοντας τις πειραματικές μετρήσεις με το EKV3 μοντέλο, έχουμε τις εξής χαρακτηριστικές :

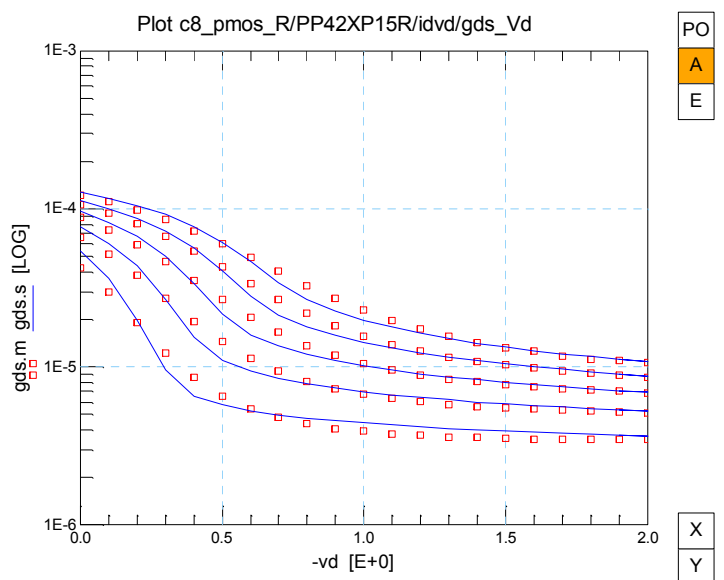
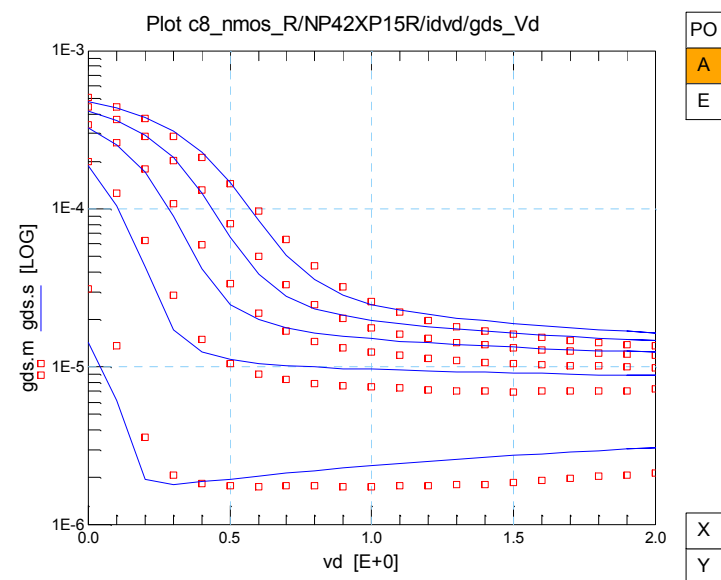
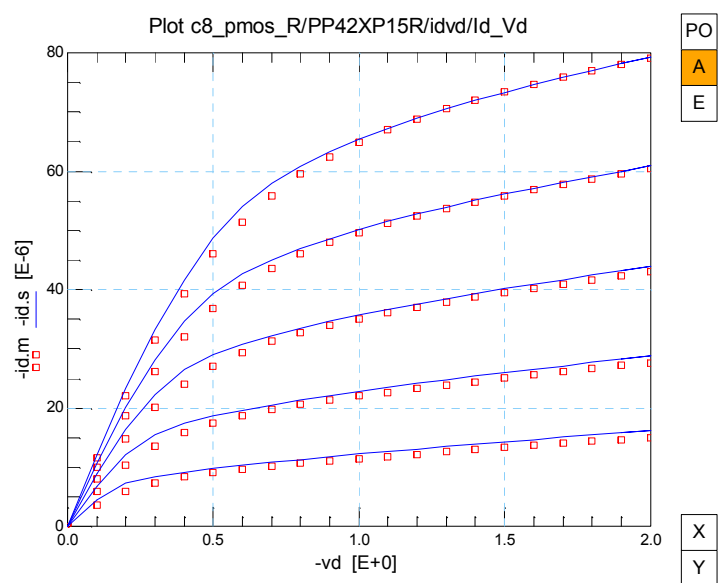
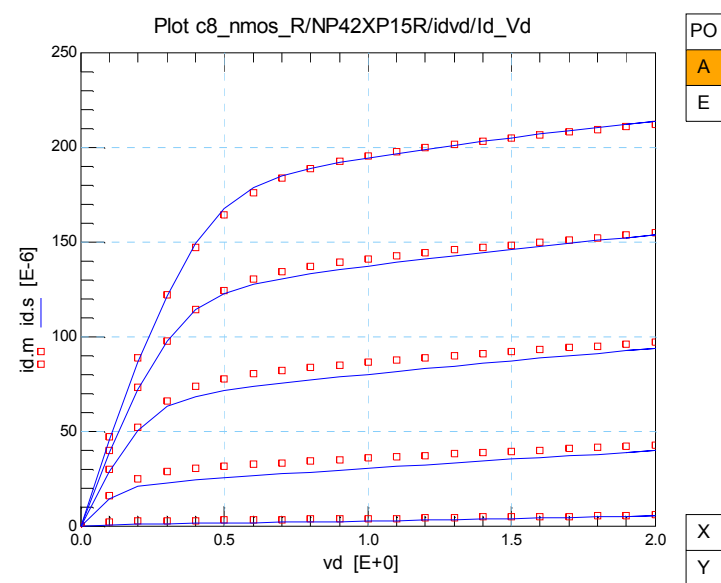












Parameter set for 0.15um

	NMOS	PMOS
COX	8.5m	8.8m
XJ	30.00n	50.00n
VTO	400.0m	-952.1m
PHIF	460.0m	451.8m
GAMMA	440.0m	610.0m
GAMMAG	32	35
KP	400.6u	85.00u
E0	450MEG	500.0MEG
E1	174.0MEG	520.0MEG
ETA	700.0m	330.0m
DL	-16.64n	-25.1n

DW	-35.00n	-15.0n
UCRIT	2.800MEG	6.500MEG
LAMBDA	195.0m	535.0m
DELTA	1.9	2.0
ACLM	0.83	0.83
LR	55.0n	55.0n
QLR	925u	-2.35m
NLR	390m	10m
LETA	1.42	1.0
WETA	450m	1.0
ETAD	640m	1.1
SIGMAD	1.0	1.0
WR	80.0n	80.00n
QWR	0	450.0u
NWR	0.01	1.45m
DDITS	0.1	0.3
LQWR	0.0	0.0
LNWR	0.0	0.0
LWR	0.0	0.0
WQLR	0	-24m
WNLR	320n	14m
WLR	0	0
WUCRIT	130.0n	-10.0u
WLAMBDA	-160n	30.0n
WETAD	0	0
WE0	0	0
WE1	0	0
WRLX	0	0
RLX	166u	600u