



1^η

Εργαστηριακή άσκηση

**Σχεδίαση layout και προσομοίωση κυκλώματος με το
πρόγραμμα MICROWIND**

ΑΘΗΝΑ 27/10/2020

1 Γενική εισαγωγή

Η διαδικασία σχεδίασης ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (digital design), ειδικά σε μεγάλες κλίμακες ολοκλήρωσης (VLSI) είναι μια πολύπλοκη αλληλουχία βημάτων που στοχεύουν στην βέλτιστη μετάβαση από τις προδιαγραφές στην υλοποίηση. Τα βήματα αυτά μπορούν να διαταχθούν σε διαφορετικά αφαιρετικά επίπεδα, σε μορφή μάλιστα πυραμίδας. Τα υψηλότερα αφαιρετικά επίπεδα χαρακτηρίζονται από μεγάλη αφαιρετικότητα και συνοπτικές περιγραφές. Το αντίθετο συμβαίνει στα χαμηλότερα αφαιρετικά επίπεδα. Στο εργαστηριακό κομμάτι του μαθήματος θα ασχοληθούμε με το χαμηλότερο αφαιρετικό επίπεδο σχεδίασης, που ονομάζεται *επίπεδο φυσικής σχεδίασης* (physical design), και ασχολείται με την κατασκευή και τον έλεγχο των γεωμετρικών μασκών που απαιτούνται για να δημιουργηθούν μετά από μια σειρά διεργασιών ημιαγωγίμες διατάξεις πάνω σε μια λεπτή φέτα πυριτίου.

2 Αντικείμενο της πρώτης εργαστηριακής άσκησης

Σκοπός της πρώτης εργαστηριακής άσκησης είναι η γνωριμία με το πακέτο λογισμικού MICROWIND για σχεδίαση, έλεγχο και προσομοίωση κυκλωμάτων VLSI. Το πρόγραμμα MICROWIND (<http://www.microwind.org>) ξεκίνησε στο Πανεπιστήμιο Institut National des Sciences Appliquées (INSA) στην Toulouse της Γαλλίας σαν ακαδημαϊκό βοήθημα για το αντίστοιχο μάθημα. Οι αρχικές του εκδόσεις είχαν αρκετές ελλείψεις και ακολουθούσαν απλουστευμένη μεθοδολογία σχεδίασης. Τα τελευταία χρόνια όμως και σε συνεργασία με την εταιρεία κατασκευής ημιαγωγών και ψηφιακών κυκλωμάτων STMicroelectronics (<http://www.st.com>), το πρόγραμμα MICROWIND έγινε εμπορικό και βελτιώθηκε σημαντικά. Το κύριο πλεονέκτημά του σε σχέση με άλλα ανταγωνιστικά εργαλεία είναι η συμπαγής λειτουργία δηλαδή, όλες οι βασικές λειτουργίες της φυσικής σχεδίασης καλύπτονται από ένα κύριο πρόγραμμα με ένα μενού επιλογής εντολών και μία γραμμή εργαλείων.

Στο χώρο του εργαστηρίου υπάρχει διαθέσιμη η ακαδημαϊκή έκδοση 3.1 του προγράμματος MICROWIND την οποία μπορείτε να προμηθευτείτε και να εγκαταστήσετε όσες φορές θέλετε και σε όποιο χώρο εργασίας σας διευκολύνει. Βέβαια η παρουσία σας στο εργαστήριο είναι υποχρεωτική, όπου θα γίνεται η εισαγωγή στην εκάστοτε εργαστηριακή άσκηση, η επίλυση αποριών, η εξέταση και η παρουσίαση ειδικών θεμάτων και τεχνικών. Χρήσιμες πληροφορίες μπορείτε να βρίσκετε στη σελίδα των μαθημάτων του εργαστηρίου <https://mycourses.ntua.gr> καθώς επίσης και να παραδίδετε ηλεκτρονικά τις ομαδικές αναφορές για την κάθε εργαστηριακή άσκηση.

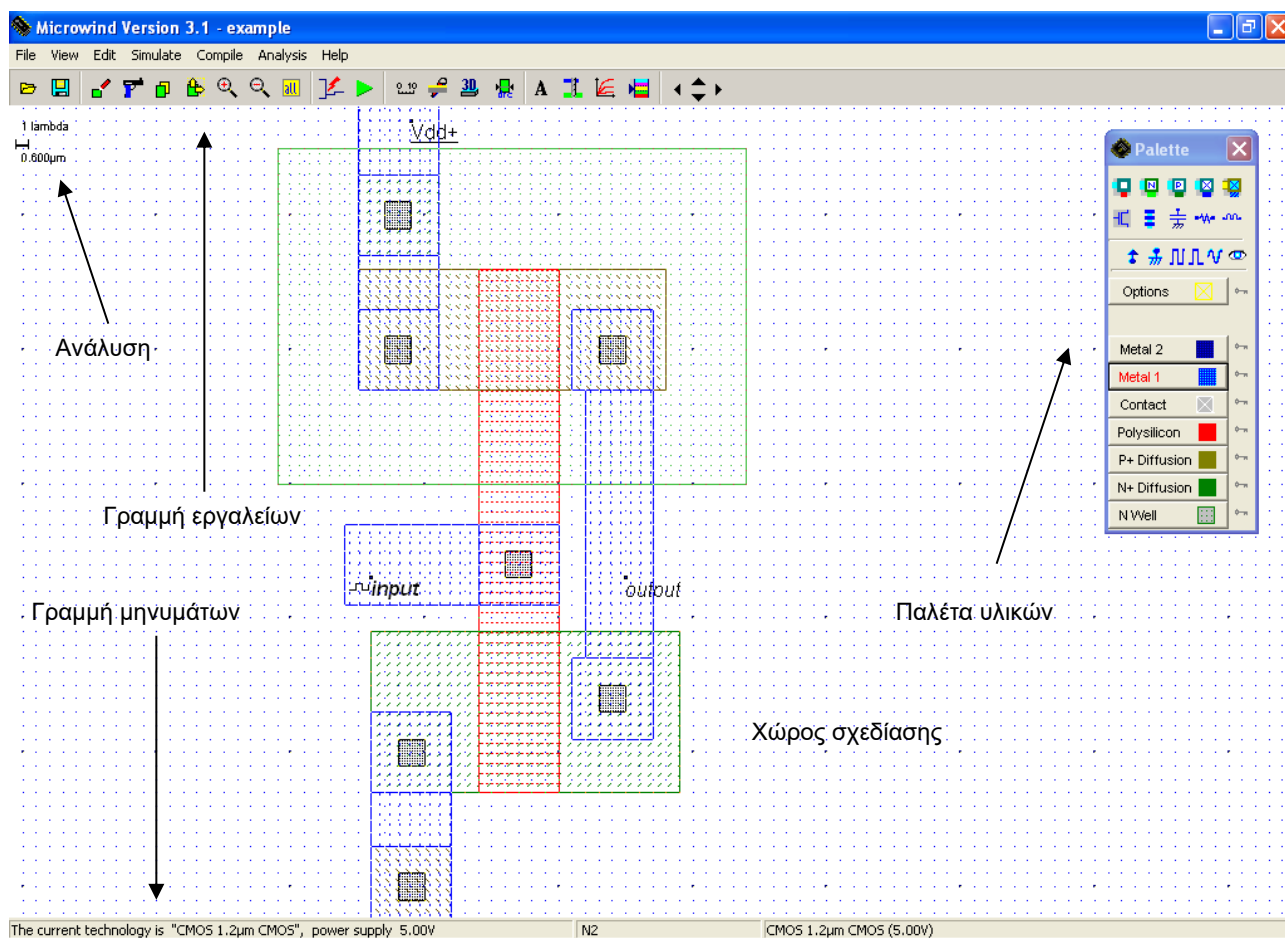
Με το πρόγραμμα MICROWIND μπορείτε να κάνετε:

- Κατασκευή φυσικού σχεδίου (layout) ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος αναλυτικά (full custom), τρανζίστορ προς τρανζίστορ.
- Ιεραρχική κατασκευή φυσικού σχεδίου από έτοιμα φυσικά σχέδια υπομονάδων, τη γεννήτρια φυσικών σχεδίων MOS τρανζίστορ, ή περιγραφές γλώσσας Verilog.
- Έλεγχο φυσικού σχεδίου και έλεγχο τήρησης των κανόνων σχεδίασης (ελάχιστες απαιτούμενες διαστάσεις ή αποστάσεις μεταξύ διαφορετικών σχημάτων) της τεχνολογίας υλοποίησης.
- Μετρήσεις για την εξαγωγή χαρακτηριστικών μεγεθών και λειτουργικών παραμέτρων κυκλωμάτων CMOS.
- Προσομοίωση επιπέδου SPICE του κυκλώματος που αντιστοιχεί στο φυσικό σχέδιο.

Στην πρώτη εργαστηριακή άσκηση, που είναι εισαγωγική, θα ολοκληρώσετε την σχεδίαση και τον έλεγχο ενός αναστροφέα CMOS και μιας πύλης μετάδοσης. Θα εξοικειωθείτε με τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός MOS τρανζίστορ και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους καθώς επίσης και για τη συνδεσμολογία τους για τη δημιουργία κυκλωμάτων CMOS. Θα μπορέσετε να μετρήσετε τόσο στο φυσικό σχέδιο όσο και στην προσομοίωση κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη.

3 Εισαγωγή στο πρόγραμμα MICROWIND


















Η κεντρική οθόνη του προγράμματος MICROWIND εικονίζεται στο Σχήμα 1.1 που ακολουθεί.






Σχήμα 1.1: Η κεντρική οθόνη του MICROWIND

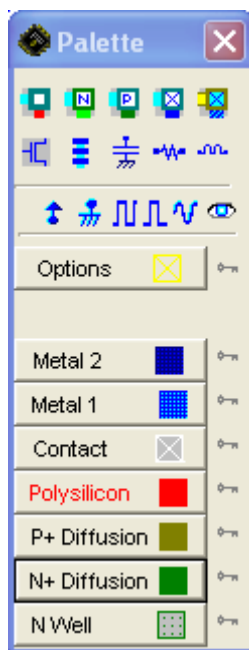
Η κεντρική και κύρια οθόνη περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που βοηθούν στην κατασκευή του φυσικού σχεδίου ενός κυκλώματος CMOS. Το μεγαλύτερο μέρος της αποτελεί το χώρο σχεδίασης πάνω στον οποίο πρέπει να σχεδιαστούν τα απαιτούμενα γεωμετρικά σχήματα ενός φυσικού σχεδίου. Ο χώρος σχεδίασης μπορεί να έχει ορατό και το πλαίσιο σχεδίασης, του οποίου η ανάλυση αναφέρεται στην πάνω αριστερή γωνία του και μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της εστίασης (zoom) του φυσικού σχεδίου. Όπως στα περισσότερα προγράμματα έτσι και το MICROWIND περιλαμβάνει μενού επιλογής εντολών, γραμμή εργαλείων και γραμμή μηνυμάτων. Επίσης περιλαμβάνει μια παλέτα υλικών, η οποία αλλάζει ανάλογα με την τεχνολογία υλοποίησης (κάθε τεχνολογία υλοποίησης έχει διαφορετικά υλικά, όπως για παράδειγμα περισσότερα επίπεδα μετάλλου). Στην παλέτα αυτή περιλαμβάνονται και κάποια σύνθετα σχεδιαστικά εργαλεία όπως γεννήτριες επαφών, γεννήτρια MOS τρανζίστορ, γεννήτριες παθητικών στοιχείων (αντιστάσεις, χωρητικότητες, επαγωγές) και εργαλεία για τον καθορισμό των εισόδων και των εξόδων ενός κυκλώματος. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά η γραμμή εργαλείων και η παλέτα υλικών. Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορείτε να ανατρέξετε στον οδηγό χρήσης του προγράμματος MICROWIND που μπορείτε να προμηθευτείτε σε ηλεκτρονική μορφή στο εργαστήριο, μαζί με το λογισμικό.

Οι βασικές σχεδιαστικές λειτουργίες και λειτουργίες ελέγχου του προγράμματος MICROWIND μπορούν να εκτελεστούν πατώντας τα κουμπιά της γραμμής εργαλείων. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται μια συνοπτική περιγραφή για το καθένα.

Κουμπί	Λειτουργία
	Ανάκτηση αρχείου φυσικού σχεδίου.
	Αποθήκευση αρχείου φυσικού σχεδίου.
	Σχεδίαση ορθογώνιου παραλληλόγραμμου με το υλικό που έχει επιλεγεί από την παλέτα υλικών.
	Διαγραφή στοιχείων από το φυσικό σχέδιο που επιλέγονται είτε με απλό πάτημα στο αριστερό πλήκτρο του ποντικιού είτε περικλείοντάς τα σε ένα παραλληλόγραμμο με τη βοήθεια του ποντικιού.
	Αντιγραφή στοιχείων από το φυσικό σχέδιο που επιλέγονται περικλείοντάς τα σε ένα παραλληλόγραμμο με τη βοήθεια του ποντικιού.
	Επέκταση μιας πλευράς σε παραλληλόγραμμο στοιχείο του φυσικού σχεδίου. Η πλευρά επιλέγεται με απλό πάτημα του αριστερού πλήκτρου του ποντικιού.
	Αύξηση της εστίασης στο φυσικό σχέδιο.
	Μείωση της εστίασης στο φυσικό σχέδιο.
	Μεταβολή της εστίασης στο φυσικό σχέδιο ώστε να είναι ορατά όλα τα στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί.
	Φωτισμός των στοιχείων του φυσικού σχεδίου που βρίσκονται σε κοινό αγωγίμο δρόμο με σημείο που επιλέγεται με πάτημα του αριστερού πλήκτρου του ποντικιού. Πολύ χρήσιμο για τον εντοπισμό βραχυκυκλωμάτων.
	Έναρξη προσομοίωσης.
	Σχεδίαση οριζόντιου ή/και κατακόρυφου χάρακα μετρήσεων.
	Εμφάνιση τομής του φυσικού σχεδίου.
	Εμφάνιση του φυσικού σχεδίου σε 3 διαστάσεις βήμα προς βήμα, σε σχέση με τις διάφορες διεργασίες δημιουργίας ημιαγωγικών στοιχείων στο πυρίτιο.
	Έλεγχος κανόνων σχεδίασης της επιλεγμένης τεχνολογίας υλοποίησης.
	Τοποθέτηση κειμένου στο φυσικό σχέδιο.
	Δημιουργία περασμάτων (vias) μεταξύ διαφορετικών επιπέδων υλικών στο φυσικό σχέδιο.

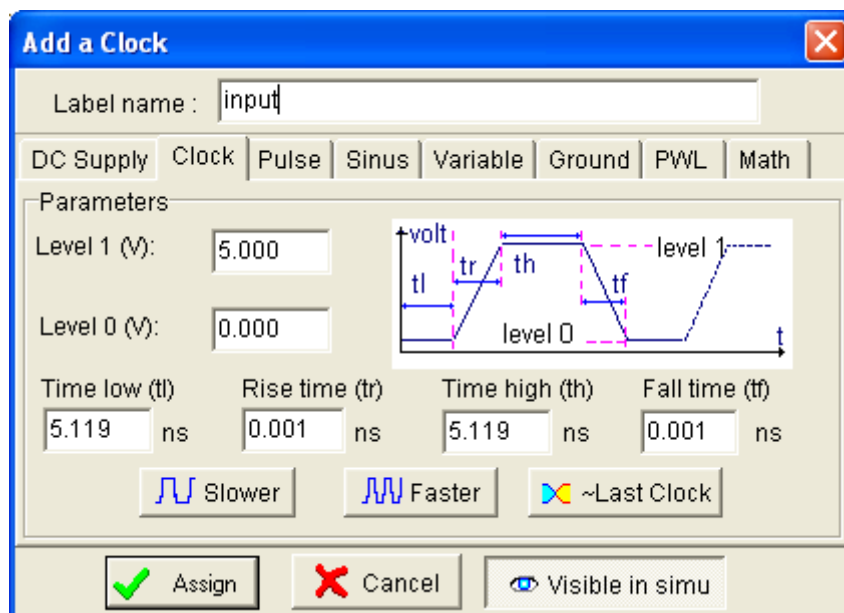
	Μελέτη και μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών ενός MOS τρανζίστορ από το φυσικό σχέδιο.
	Εμφάνιση της παλέτας υλικών.
	Μετακίνηση του φυσικού σχεδίου αντίθετα από την επιλεγμένη κατεύθυνση.

Η παλέτα υλικών αποτελεί το δεύτερο βασικό σχεδιαστικό εργαλείο του προγράμματος MICROWIND. Η μορφή της (για τεχνολογία υλοποίησης με δύο επίπεδα μετάλλου) δίνεται στο Σχήμα 1.2.

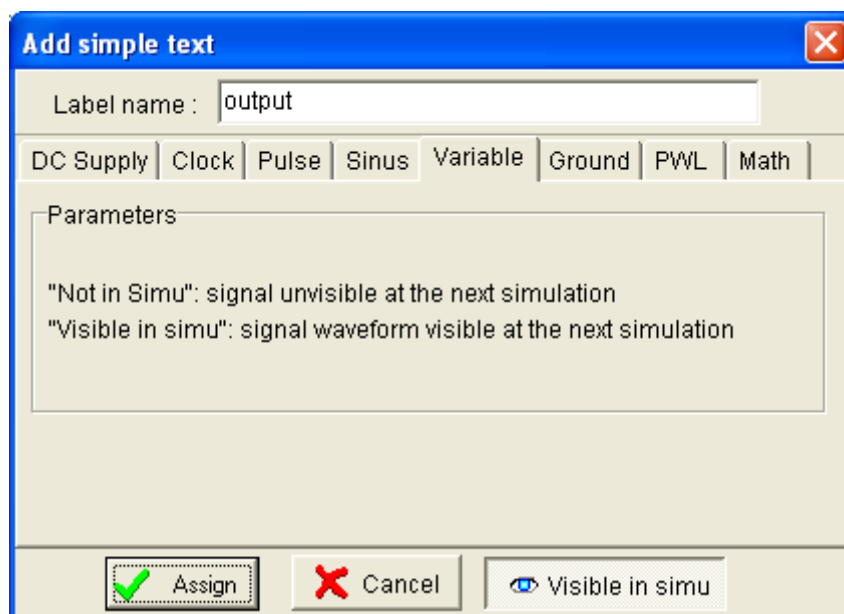


Σχήμα 1.2: Η παλέτα υλικών

Το κάτω τμήμα της παλέτας υλικών περιλαμβάνει κουμπιά με όλα τα διαθέσιμα υλικά για κάθε τεχνολογία υλοποίησης. Επιλέγοντας ένα από αυτά και το κουμπί σχεδίασης παραλληλόγραμμου από τη γραμμή εργαλείων, σχεδιάζουμε παραλληλόγραμμα με το αντίστοιχο υλικό (π.χ. πολυπυρίτιο, διάχυση τύπου n , κ.λπ.). Τα κλειδιά δίπλα σε κάθε υλικό απενεργοποιούν όλα τα αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί με αυτό το υλικό, διευκολύνοντας τις μεταβολές στα υπόλοιπα. Το πάνω τμήμα της παλέτας περιλαμβάνει κάποια σύνθετα σχεδιαστικά εργαλεία όπως γεννήτριες επαφών μεταξύ επιπέδων από διαφορετικά υλικά, γεννήτρια MOS τρανζίστορ, γεννήτριες παθητικών στοιχείων (αντιστάσεις, χωρητικότητες, επαγωγές) και εργαλεία για τον καθορισμό των εισόδων και των εξόδων ενός κυκλώματος. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα κουμπιά της πρώτης γραμμής που δημιουργούν επαφές μεταξύ επιπέδων και από τα κουμπιά της τελευταίας γραμμής, το πρώτο που ορίζει το σημείο τροφοδοσίας V_{dd} , το δεύτερο που ορίζει το σημείο τροφοδοσίας V_{ss} , το τρίτο που ορίζει σημείο εισόδου με παλμοσειρά και το τελευταίο που ορίζει σημείο εξόδου. Για παράδειγμα, πατώντας το κουμπί ορισμού εισόδου με παλμοσειρά, εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 1.3 με πεδία και κουμπιά από τα οποία ορίζονται όλες οι παράμετροι της παλμοσειράς. Αντίστοιχα, πατώντας το κουμπί ορισμού εξόδου εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 1.4. Προσέξτε και στα δύο παράθυρα το κουμπί κάτω δεξιά που γράφει “Visible in simu”. Σε περίπτωση που γράφει “Not in simu”, η αντίστοιχη είσοδος ή έξοδος δεν θα εμφανίζεται στις κυματομορφές προσομοίωσης. Η εναλλαγή μεταξύ των δύο καταστάσεων γίνεται με διαδοχικά πατήματα του κουμπιού.

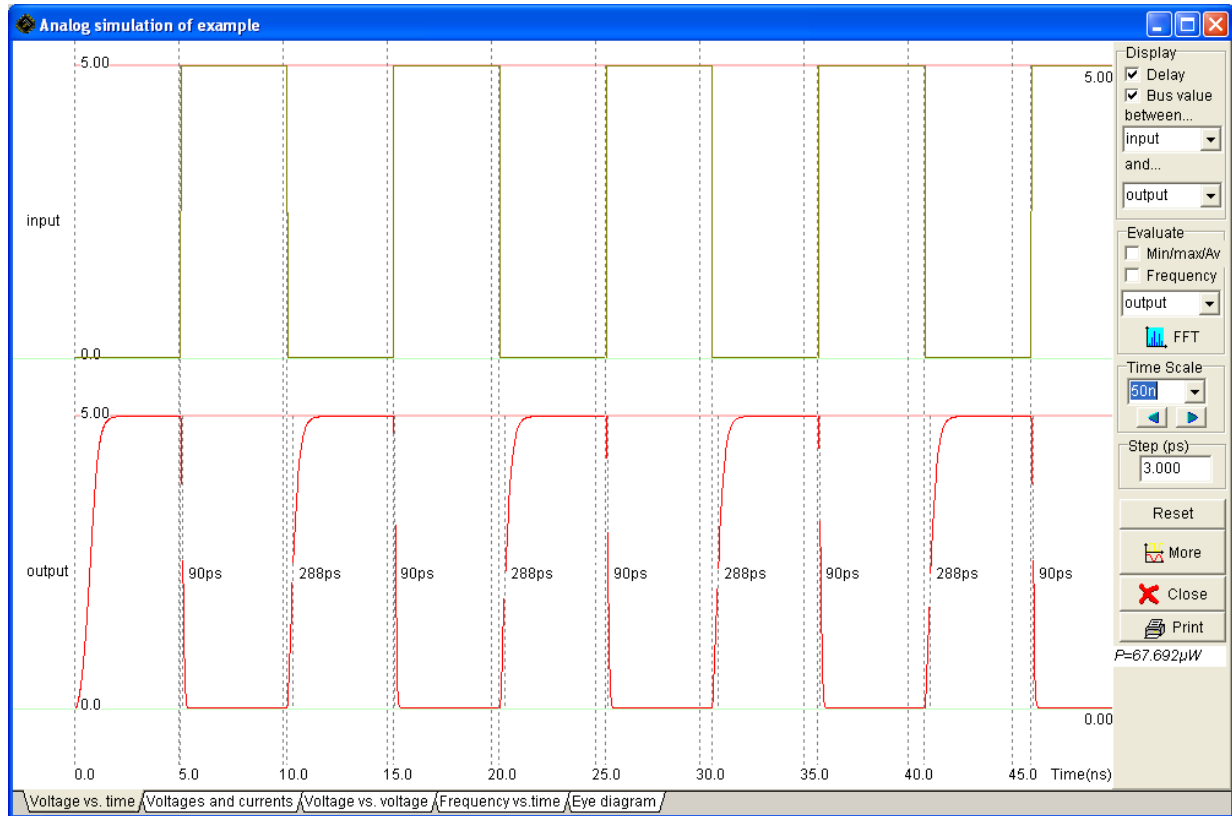


Σχήμα 1.3: Ορισμός εισόδου με παλμοσειρά



Σχήμα 1.4: Ορισμός εξόδου

Τέλος, στο Σχήμα 1.5 εικονίζεται το παράθυρο προσομοίωσης για το κύκλωμα ενός αναστροφέα, που εμφανίζεται με το πάτημα του αντίστοιχου κουμπιού από τη γραμμή εργαλείων. Το παράθυρο απεικονίζει όλες κυματομορφές εισόδου ή εξόδου έχουν ενεργοποιημένο του κουμπί “Visible in simu” και στο δεξιό άκρο έχει μια σειρά από κουμπιά και πεδία επιλογών. Από αυτά, πολύ χρήσιμο είναι το πεδίο “Time Scale”, που καθορίζει το ορατό τμήμα των κυματομορφών καθώς και τα κουμπιά κατεύθυνσης που βρίσκονται από κάτω του και κάνουν χρονική μετατόπιση των κυματομορφών. Τα χρονικά διαστήματα που αναγράφονται πάνω στην κυματομορφή εξόδου είναι οι χρόνοι καθυστέρησης ανόδου και καθόδου μεταξύ των κυματομορφών εισόδου και εξόδου και η απεικόνισή τους έχει επιλεγεί από τα πεδία πάνω δεξιά.



Σχήμα 1.5: Προσομοίωση

4 Τα ζητούμενα της εργαστηριακής άσκησης

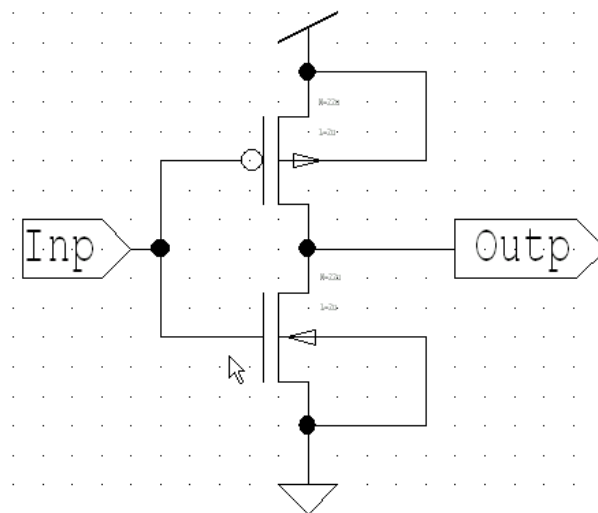
- 1 Από το κύριο μενού επιλέξτε “File” και μετά “Open”. Πηγαίνετε στον υποκατάλογο “examples” και επιλέξτε το αρχείο “inverter.msk”. Πρόκειται για το φυσικό σχέδιο ενός αναστροφέα. Μελετήστε τη χωροθέτηση των γεωμετρικών στοιχείων που τον αποτελούν.
- 2 Σε νέο αρχείο κάντε τη σχεδίαση ενός άλλου αναστροφέα έχοντας το προηγούμενο αρχείο αλλά και το σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 1.6 σαν πρότυπο. Επιλέξτε τεχνολογία υλοποίησης από το κύριο μενού πατώντας “File” και στη συνέχεια “Select Foundry” και επιλέξτε το αρχείο “cmos65n.rul”. Η τεχνολογία αυτή έχει $\lambda=35\text{nm}$ και συνεπώς ελάχιστη διάσταση στοιχείου 70nm . Ξεκινήστε τη σχεδίαση φέρνοντας δύο τρανζίστορ, ένα τύπου n και ένα τύπου p (μέσα σε n πηγάδι το δεύτερο) από τη γεννήτρια MOS στην παλέτα υλικών. Επιλέξτε αυθαίρετα μήκος και πλάτος καναλιού. Τοποθετήστε το πρώτο τρανζίστορ κάτω από το δεύτερο έτσι ώστε τα δύο πολυπυρίτια να βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφη ευθεία. Συνδέστε τα δύο πολυπυρίτια χρησιμοποιώντας το κουμπί επέκτασης από τη γραμμή εργαλείων. Στη συνέχεια κάντε τις συνδέσεις με μέταλλο-1 όπως φαίνονται στον ήδη σχεδιασμένο αναστροφέα του αρχείου. Από τις μεταλλικές επαφές τροφοδοσίας πολώστε το υπόστρωμα (νοείται όλη η μαύρη περιοχή) σε V_{ss} με επαφή μετάλλου προς διάχυση $p+$ και το πηγάδι σε V_{dd} με επαφή μετάλλου προς διάχυση $n+$ (προσοχή, τα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν στο αρχείο προτύπου). Επίσης επιλέξτε επαφή μετάλλου-πολυπυριτίου για να ενώσετε την κοινή πύλη με τη μεταλλική επαφή εισόδου.
- 3 Σχεδιάστε αναστροφέα CMOS αναλυτικά, δηλαδή να χρησιμοποιηθούν μόνο τα υλικά της παλέτας (Full Custom), σε τεχνολογία *cmos45n* (τεχνολογία 45nm , $\lambda=20\text{nm}$) με τις εξής διαστάσεις: $W_p=160\text{nm}$, $W_n=80\text{nm}$, $L_p=L_n=40\text{nm}$, όπου W το πλάτος του καναλιού του τρανζίστορ και L το μήκος του καναλιού του τρανζίστορ. Στη συνέχεια να γίνει η προσομοίωση του κυκλώματος με είσοδο τετραγωνική παλμοσειρά (0 - 1V).

- 4 Σχεδιάστε πύλη μετάδοσης CMOS αναλυτικά (Σχ. 1.7), σε τεχνολογία $cmos45nm$ (τεχνολογία $45nm$, $\lambda=20nm$) και διαστάσεις: $W_p=320nm$, $W_n=320nm$, $L_p=L_n=45nm$, όπου W το πλάτος του καναλιού του τρανζίστορ και L το μήκος του καναλιού του τρανζίστορ. Ως αναστροφέας να χρησιμοποιηθεί το προηγούμενο κύκλωμα (Ζήτημα 3^ο). Επίσης να γίνει η προσομοίωση του κυκλώματος με είσοδο τετραγωνική παλμοσειρά (0 – 1V) με ανοιχτή ($C=1$) και κλειστή την πύλη ($C=0$).

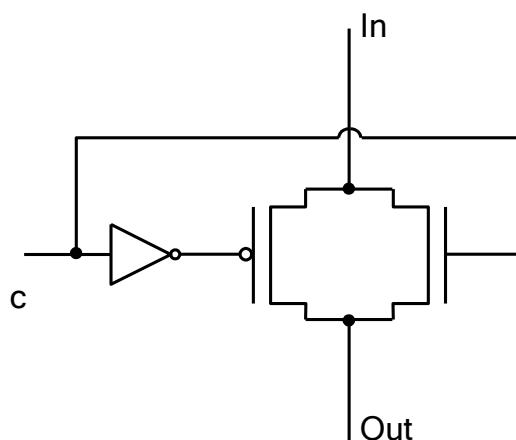
Οι εκθέσεις των θεμάτων 3 και 4, πρέπει να παραδοθούν την Κυριακή (έως τις 12 μμ.) της εβδομάδας που έγινε η εξέταση του εργαστηρίου. Οι εκθέσεις θα πρέπει να είναι **σύντομες** και να περιλαμβάνουν:

- Layouts
- Τομές (μία για κάθε κύκλωμα σε περιοχή που κρίνετε ως κρίσιμη)
- Κυματομορφές εισόδου - εξόδου
- Σχόλια (όπου χρειάζονται)

Η αποστολή των εκθέσεων θα γίνεται μόνο ηλεκτρονικά (αρχείο .doc ή .pdf) στη σελίδα <https://mycourses.ntua.gr> (από ένα μέλος, για την κάθε ομάδα).



Σχ. 1.6: Σχηματικό διάγραμμα αναστροφέα CMOS



Σχ. 1.7: Σχηματικό διάγραμμα πύλης μετάδοσης CMOS