

ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΑΙΣΘΗΣΗΣ

Αναφορά Σχεδιαστικής Εργασίας στο Μάθημα «Σχεδίαση VLSI»

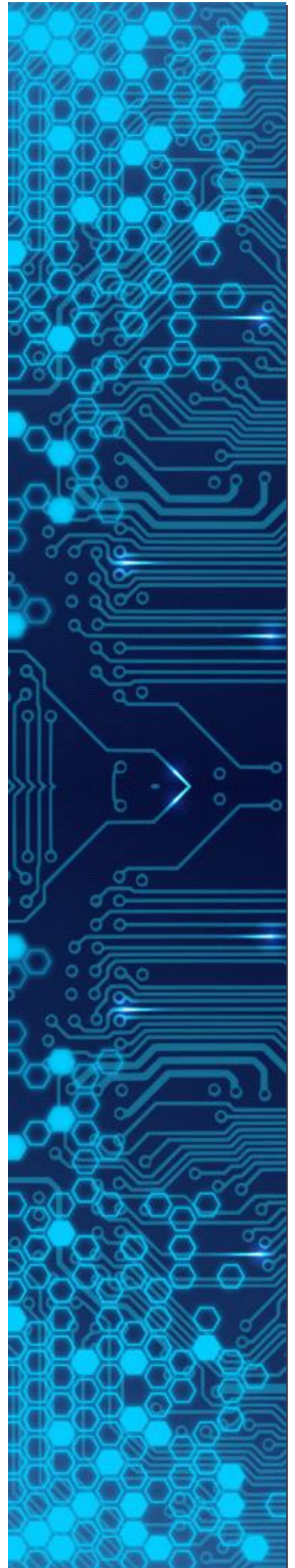
Επιβλέποντας καθηγητής: Παυλίδης Βασίλειος

Δεκέμβριος 2023, Θεσσαλονίκη

Συγγραφείς: Ομάδα 10

Καμπουρίδου Ηλιάννα 10169 iliakamp@ece.auth.gr

Τσιτσάνου Άννα 10051 tsitsanou@ece.auth.gr



Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	2
Ενισχυτής αίσθησης	2
Υλοποίηση	2
Σχεδίαση	2
Συνδεσμολογία	2
Σχηματικό	3
Σύμβολο	4
Προσομοίωση	4
Ανάλυση διαφοράς τάσης	5
Χρονική ανάλυση	6
Ανάλυση κέρδους	7
Φυσικό σχέδιο	7
Διασυνδέσεις	7
Υποστρώματα	8
Έλεγχοι φυσικού σχεδίου	9
DRC	9
LVS	9

Εισαγωγή

Ενισχυτής αίσθησης

Ο ενισχυτής αίσθησης είναι ένα κύκλωμα που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση και την ανίχνευση μικρών σημάτων σε ηλεκτρονικά συστήματα. Είναι βασικό στοιχείο σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, ειδικότερα μνήμης όπως η Δυναμική Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης (DRAM) και άλλων εφαρμογών όπου η ανίχνευση σήματος, η ανάγνωση και η ενίσχυσή του είναι απαραίτητες.

Η βασική λειτουργία του είναι να ανιχνεύει και να ενισχύει μικρές διαφορές τάσης μεταξύ δύο αλληλοσυμπληρούμενων σημάτων. Στο πλαίσιο των συστημάτων μνήμης, χρησιμοποιείται για την ανάγνωση πληροφοριών από κυψέλες DRAM ή SRAM, εξασφαλίζοντας τη σωστή ερμηνεία των αποθηκευμένων δεδομένων. Όταν χρησιμοποιείται για την ανάγνωση δεδομένων από τη μνήμη, ο ρόλος του είναι να ανιχνεύει τα σήματα χαμηλής ισχύος, που αντιπροσωπεύουν bit δεδομένων (1 ή 0) και που είναι αποθηκευμένα σε μια κυψέλη μνήμης. Έπειτα τα ενισχύει σε αναγνωρίσιμα λογικά επίπεδα, ώστε τα δεδομένα να μπορούν να ερμηνευτούν σωστά έξω από τη μνήμη.

Συνολικά, ο ενισχυτής αίσθησης μπορεί να ενσωματωθεί σε διάφορα στοιχεία μνήμης, ανάλογα με τις ανάγκες και τις εφαρμογές του συστήματος που σχεδιάζεται. Υπάρχει ένας ενισχυτής αίσθησης για κάθε στήλη κυψελών μνήμης. Ως εκ τούτου, οι ενισχυτές αίσθησης είναι ένα από τα λίγα εναπομείναντα αναλογικά κυκλώματα στο υποσύστημα μνήμης ενός υπολογιστή.

Υλοποίηση

Όλη η εργασία σε επίπεδο σχηματικού, testbench και layout κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα virtuoso της cadence. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για σχεδίαση και επαλήθευση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, προσφέροντας τα κατάλληλα εργαλεία για αναλύσεις αναλογικών, ψηφιακών και μεικτών κυκλωμάτων.

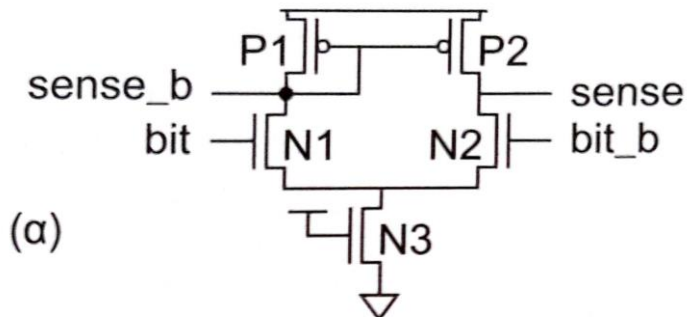
Σχεδίαση

Συνδεσμολογία

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σχεδιασμού ενισχυτών αισθήσεως. Τα χαρακτηριστικά τους, όπως η κατανάλωση ενέργειας και η ανοχή στο θόρυβο, μπορεί να ποικίλουν. Η επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού ενισχυτή αισθήσεως εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στην εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα 12.28.α στη σελίδα 512 του βιβλίου Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Συστημάτων CMOS VLSI των Weste and Harris (4^η έκδοση, ISBN: 978-960-7182-67-8, 2011). Το σχήμα παρουσιάζεται και παρακάτω. Όπως φαίνεται αποτελείται από 5 τρανζίστορ, 2

τύπου p και 3 τύπου n. Έχει διαφορική είσοδο και έξοδο, συνδέεται με υψηλό και χαμηλό δυναμικό στο πάνω και το κάτω μέρος του αντίστοιχα ενώ λαμβάνει μια V_{bias} στην πύλη του τρανζίστορ N3.



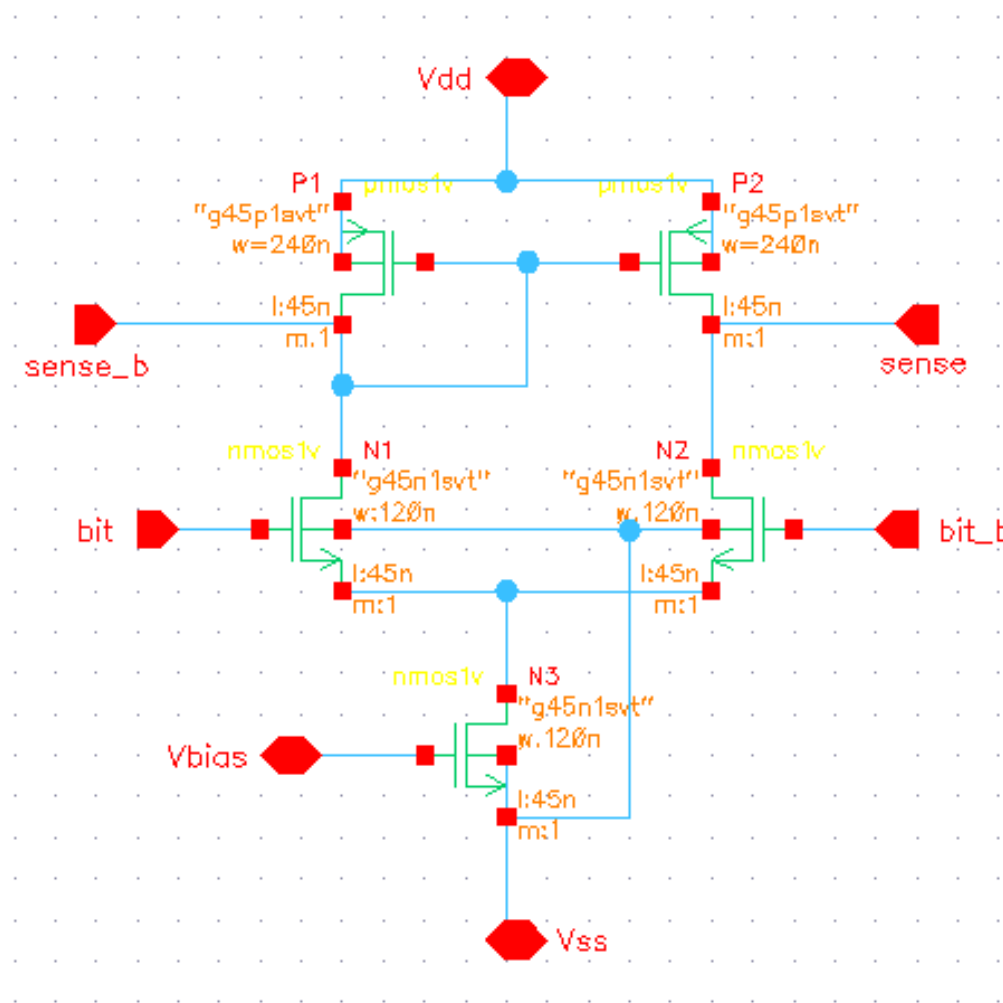
Σχηματικό

Τα τρανζίστορ ονομάστηκαν σύμφωνα με το σχήμα αναφοράς. Η σχεδίαση έχει γίνει σε τεχνολογία 45nm σύμφωνα και με την βιβλιοθήκη που δόθηκε για τα τρανζίστορ (grdk045).

Το μήκος των τρανζίστορ δίνεται από την τεχνολογία (45nm). Το πλάτος ορίστηκε στα 120nm για όλα τα nmos τρανζίστορ και στα 240nm για τα pmos. Ουσιαστικά στα nmos χρησιμοποιήσαμε το ελάχιστο μέγεθος της τεχνολογίας ενώ στα pmos το διπλασιάσαμε αυτό ώστε να εξισορροπιστεί η διαφορά ταχύτητας μεταξύ οπών και ηλεκτρονίων. Δεν υπήρχε κάποια προδιαγραφή ως προς το κέρδος ή οποιαδήποτε παράμετρο οπότε επιλέχθηκαν τα μεγέθη αυτά.

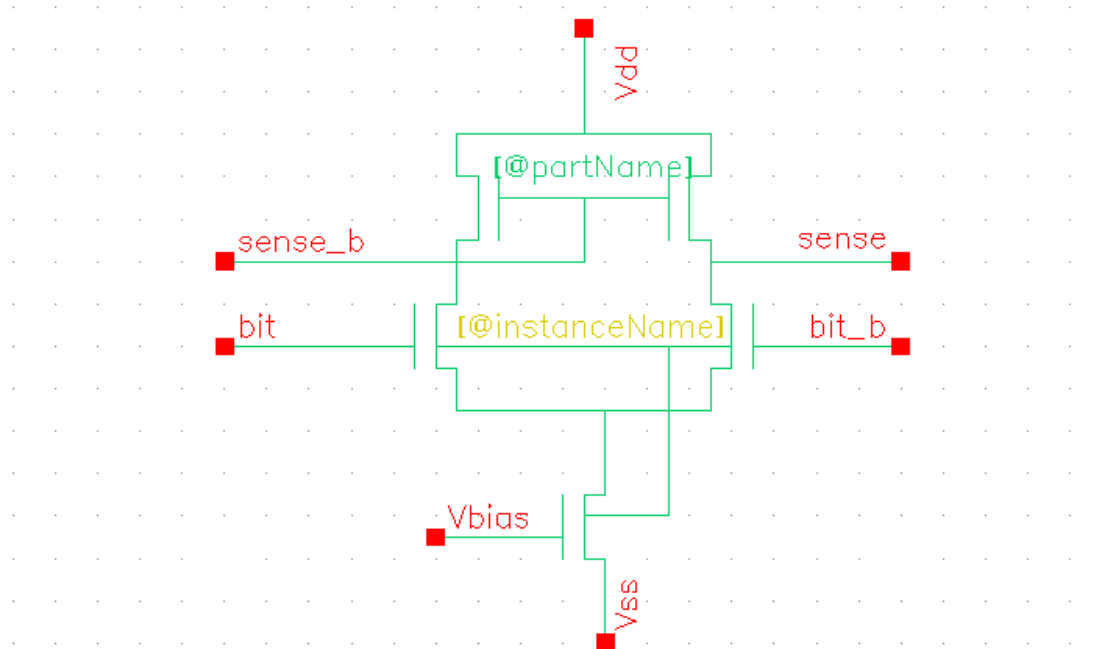
Τα υποστρώματα των pmos συνδέθηκαν στην τροφοδοσία Vdd και των nmos στην Vss. Έχουμε επιλέξει να συνδεθούν κατά αυτόν τον τρόπο ώστε το σώμα των τρανζίστορ όμοιου τύπου να βρίσκεται στο ίδιο δυναμικό και να μην βραχυκυκλώνεται με διαφορετικές τάσεις.

Στο σχηματικό τοποθετήθηκαν 7 pin, 2 για τροφοδοσία Vdd και Vss, 1 Vbias για την πύλη του N3, 2 για την διαφορική είσοδο bit και bit_b και τέλος 2 για την διαφορική έξοδο sense και sense_b. Οπότε συνολικά προκύπτει το παρακάτω σχηματικό.



Σύμβολο

Δημιουργούμε την όψη συμβόλου του σχηματικού μας. Την τροποποιούμε για καλύτερη οπτικοποίηση του κυκλώματος που κατασκευάστηκε. Αυτή πλέον αποτελεί την εικόνα που αντιπροσωπεύει το κύκλωμα μας, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, και θα τοποθετηθεί στο testbench.



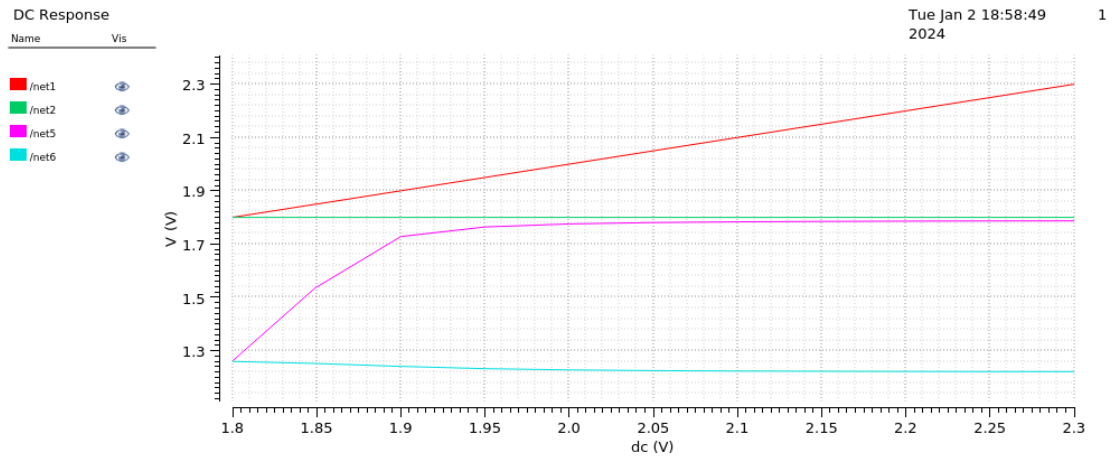
Προσομοίωση

Για την προσομοίωση του κυκλώματος τοποθετείται στην μέση η όψη συμβόλου και προσθέτουμε στα pins τα απαραίτητα στοιχεία για την ορθή λειτουργία του, όπως πηγές και παθητικά στοιχεία.

Χρησιμοποιήθηκαν αρχικά δύο dc πηγές τάσης για να οριστεί ο τροφοδοσία. Συνδέθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση στο `Vdd` να διατηρείται στα 1.8 V και στο `Vss` στα 0V, δηλαδή να είναι γειωμένη. Οι τάσεις αυτές είναι συνηθισμένες για την λειτουργία τέτοιου ίδιους κυκλωμάτων και με αυτό το κριτήριο έχουν επιλεγεί. Επιπλέον έχουμε επιλέξει να τοποθετήσουμε μια πηγή στο `Vss` παρόλο που δεν χρειάζεται και δεν χρησιμοποιείται για να μπορεί να προσαρμοστεί γρήγορα και ευκολά σε λειτουργία σε οποιαδήποτε άλλη τάση. Στο `Vbias` συνδέθηκε μία dc πηγή με τάση 0.6V. Αυτή η τάση είναι ικανοποιητική για να οδηγήσει την πύλη του τρανζίστορ N3.

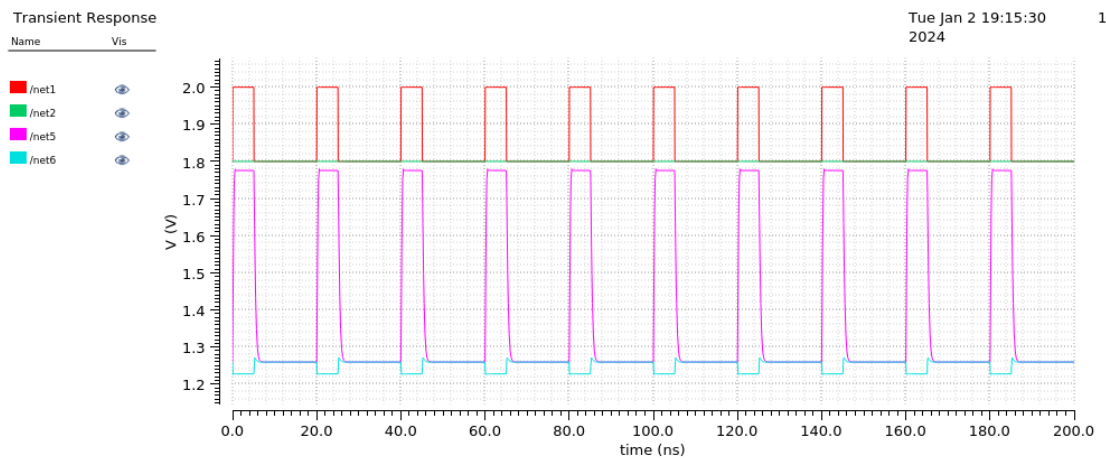
Στη διαφορική είσοδο τοποθετήθηκε μια `Vdc` καθώς και μία `Vpulse` για τη προσομοίωση της ροής δεδομένων. Ουσιαστικά, το ένα άκρο της εισόδου είναι «δεμένο» σε μία σταθερή τάση, ενώ το άλλο άκρο δέχεται ένα παλμό ανά 20ns. Έτσι ανάμεσα στα δύο άκρα της εισόδου δημιουργείται μια διαφορά τάσης, η οποία πρέπει να ανιχνευτεί από την έξοδο. Τέλος, στη διαφορική έξοδο συνδέεται ένας πυκνωτής των 1fF, συνδεδεμένος σε γείωση, σε κάθε άκρο της. Απαιτείται ένας τόσο μικρός πυκνωτής, καθώς με μεγαλύτερες τιμές δεν προλάβει να γίνει σωστά η φόρτιση και η εκφόρτιση και να παραχθεί η θεμιτή έξοδος. Η συνδεσμολογία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

Για την επιλογή των μεγεθών για τις πηγές στην είσοδο πραγματοποιήσαμε μία dc sweep, έχοντας το ένα άκρο της εισόδου συνδεδεμένο με πηγή Vdc σταθερή στα 1.8V και ο άλλο σε πηγή Vdc με τάση μία παράμετρο που κυμαίνεται από τα 1.8V έως 2.3V με βήμα 0.1V. Στις κυματομορφές που παράγονται, όπως φαίνονται στο επόμενο σχήμα, παρατηρούμε πως αρχικά όσο αυξάνετε η τάση στο ένα άκρο της εισόδου, αυξάνεται και η έξοδος. Ωστόσο όταν φτάσει περίπου στα 2V (δηλαδή 200mV περισσότερα από το άλλο άκρο) η έξοδος έχει κορεστεί και σταθεροποιείται. Επομένως επιλέγουμε να δημιουργήσουμε με την χρήση παλμού διαφορά τάσης 200mV μεταξύ των 2 άκρων. Οπότε κρατάμε τα άκρα σε σταθερή τάση των 1.8V και το ένα άκρο θα δέχεται παλμό 200mV με περίοδο 20ns.

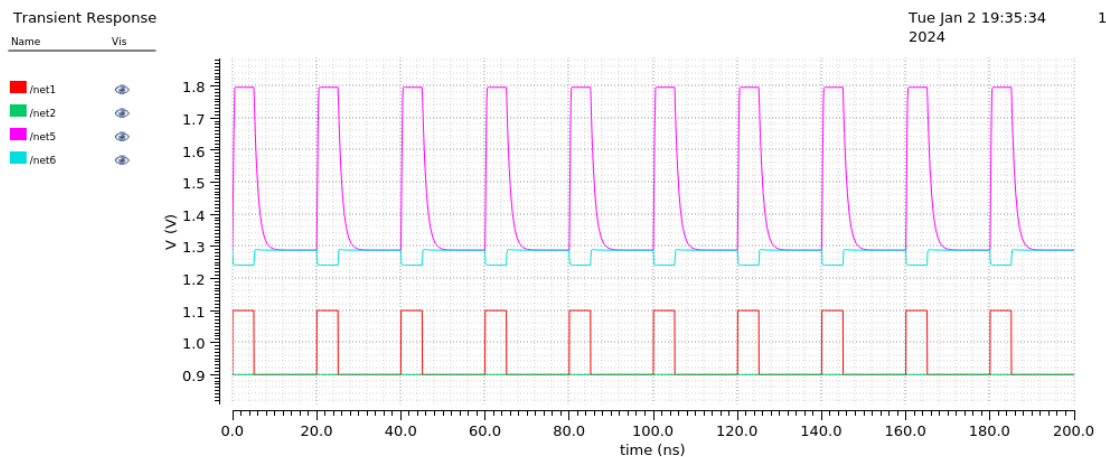


Χρονική ανάλυση

Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε μια χρονική προσομοίωση για 200ns για την είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος. Οι κυματομορφές που προέκυψαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Οι έξοδοι καταφέρνουν επιτυχώς και ακολουθούν τις εισόδους.



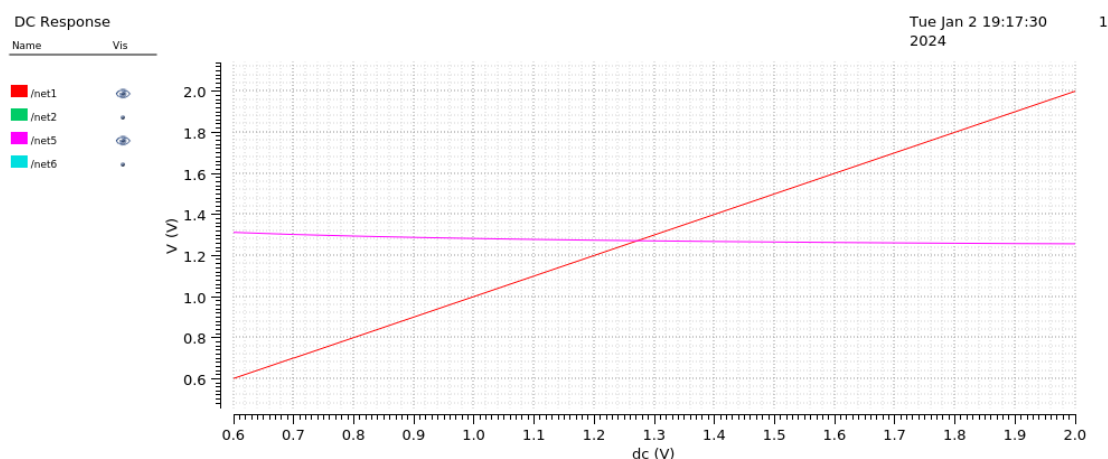
Ωστόσο, παρατηρήσαμε πως για την συγκεκριμένη τιμή τάσης στα 1.8V δεν γίνεται ενίσχυση. Έτσι επιλέξαμε να αλλάξουμε την τάση στην οποία είναι δεμένη η είσοδος σε $V_{dd}/2$, δηλαδή 0.9V. Έπειτα επαναλάβαμε την ίδια προσομοίωση, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται παρακάτω. Οι έξοδοι εμφανίζουν αντίστοιχα ικανοποιητική απόκριση και στην ίδια τάση με πριν. Αλλά αφού η τάση εισόδου είναι μικρότερη, συγκριτικά η ενίσχυση έχει αυξηθεί.



Ανάλυση κέρδους

Για να αναλύσουμε λίγο παραπάνω πως λειτουργεί η ενίσχυση, κάνω μια 2^η sweep. Μεταβάλλω την τάση εισόδου που είναι “δεμένα” τα άκρα της εισόδου από 0.6 ως 2 V. Οι κυματομορφές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Σημειώνεται πως για τα δύο άκρα προκύπτει η ίδια κυματομορφή τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο.

Παρατηρούμε ότι ενώ η είσοδος αυξάνεται γραμμικά, η έξοδος διατηρείται σχεδόν στην ίδια τάση στα 1.3 V. Οπότε είναι προτιμότερη μια μικρή τάση στην είσοδο ώστε να εκμεταλλευόμαστε την ενίσχυση κέρδους που θα μας δώσει η έξοδος.



Φυσικό σχέδιο

Δημιουργούμε την όψη του Layout. Φτιάχνουμε όλη την φυσική διάταξη του σχεδίου μας πάνω στο υπόστρωμα πυριτίου. Εισάγουμε όλα τα τρανζίστορ και τα pins μας. Με κόκκινο εμφανίζονται τα pins τρανζίστορ και με κίτρινο τα pins, οι πύλες των τρανζίστορ βρίσκονται στο πυρίτιο (πράσινο) ενώ οι πηγές και οι εκροές στο επίπεδο μετάλλου 1 (μπλε). Τα pins βρίσκονται και αυτά στο επίπεδο μετάλλου 1.

Γενικά προσπαθούμε να έχουμε την βέλτιστη δυνατή διάταξη. Τοποθετούμε τα στοιχεία μας με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλαμβάνουν τον ελάχιστο δυνατό χώρο αλλά ταυτόχρονα να μην παραβιάζονται και οι κανόνες της σχεδίασης, όπως ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ 2 τρανζίστορ είναι 120nm.

Διασυνδέσεις

Όλες οι διασυνδέσεις έχουν γίνει σε επίπεδο μετάλλου 1, καθώς το σχέδιο είναι μικρό και ένα επίπεδο είναι αρκετό για όλες τις διασυνδέσεις μας. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η σύνδεση των πυλών των pins τρανζίστορ που πραγματοποιείται με πυρίτιο. Γενικά αποφεύγουμε διαδρομές με αυτό το υλικό λόγω υψηλών απωλειών αλλά εδώ την έχουμε επιλέξει λόγω της φύσης της σύνδεσης, δηλαδή λόγω μικρού μήκους και 2 ακρών από πυρίτιο.

Για το μήκος των διασυνδέσεων ακολουθούμε τον οδηγό. Κατασκευάζουμε τις συνδέσεις πυριτίου στο ελάχιστο δυνατό πλάτος σύμφωνα με την τεχνολογία, δηλαδή στα 45nm, τα μέταλλα στα 60nm και τις τροφοδοσίες στα 120nm.

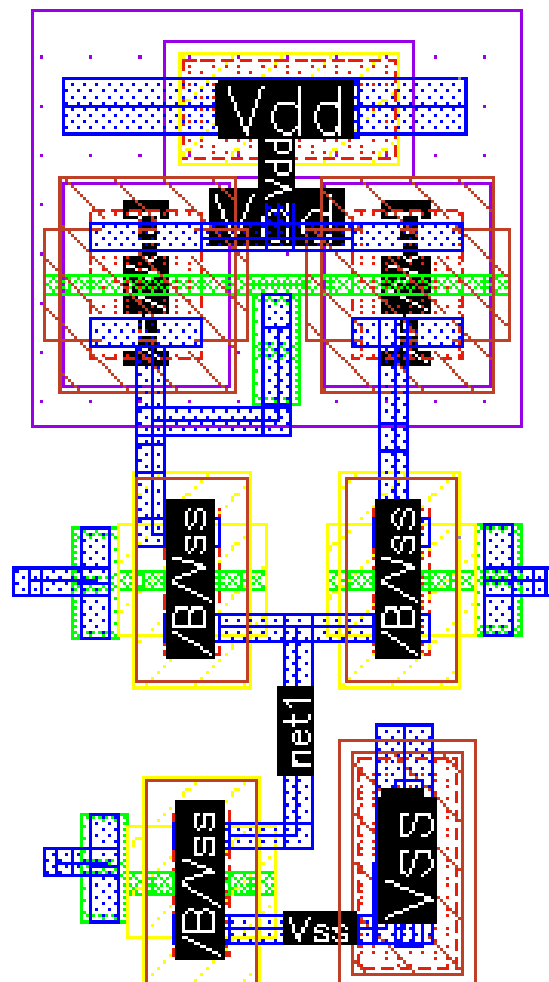
Όπου χρειάζεται σύνδεση μεταξύ διαφορετικών επιπέδων μετάλλων χρησιμοποιούμε via. Σε κάθε σύνδεση έχουμε χρησιμοποιήσει 2 via για αποφυγή σφαλμάτων στην σύνδεση.

Υποστρώματα

Για να ολοκληρωθεί η διάταξη πρέπει να συνδεθούν κατάλληλα τα υποστρώματα όλων των τρανζίστορ. Αυτό συμβαίνει μέσω των contacts που αποτελούν μια ειδική υποκατηγορία των vias. Πάνω στις επαφές αυτές έχουν σχεδιαστεί και οι γραμμές των τροφοδοσιών Vdd και Vss σε πλάτος 120nm.

Τα τρανζίστορ τύπου n έχουν διαχύσεις τύπου n και υπόστρωμα τύπου p. Οπότε τα υποστρώματα τους σχεδιάζονται απευθείας στο υπόστρωμα του σχεδίου που είναι τύπου p. Τοποθετείται μια επαφή για την σύνδεση αυτού με την τροφοδοσία Vdd. Η επαφή αυτή έχει σχεδιαστεί τριπλή και πάλι για λόγους ασφαλείας.

Αντίστοιχα τα τρανζίστορ pmos έχουν διαχύσεις τύπου p και υπόστρωμα τύπου n για αυτό χρειάζονται μια περιοχή nwell για τα υποστρώματα τους. Έχουμε σχεδιάσει και τοποθετήσει το nwell κάτω από τα pmos τρανζίστορ (μοβ). Έπειτα πάνω σε αυτό τοποθετείται αντίστοιχα μια τριπλή επαφή για σύνδεση με τον τροφοδοσία Vss στο επίπεδο 1. Οπότε το nwell περικλείει τα 2 επάνω τρανζίστορ και το μέταλλο της τροφοδοσίας όπως φαίνεται και στο σχήμα με το συνολικό layout.

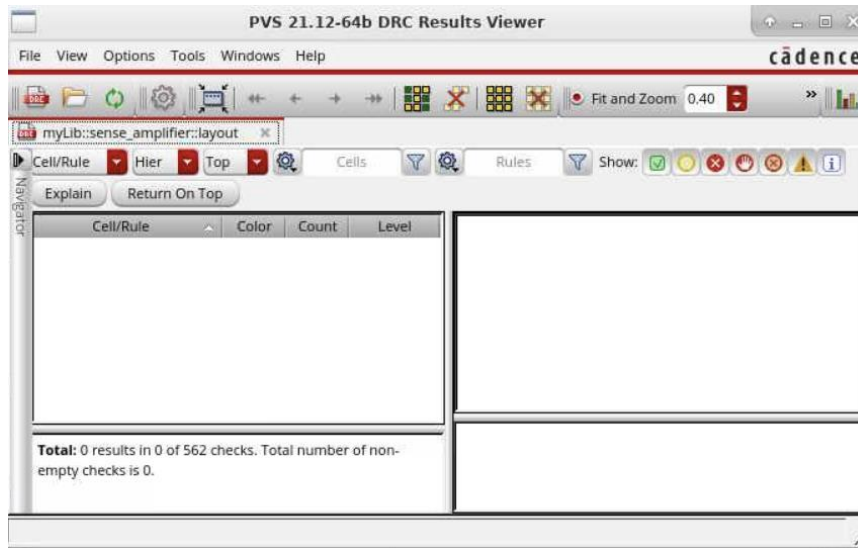


Έλεγχος φυσικού σχεδίου

DRC

Το πρώτο τεστ που εκτελούμε είναι το Design Rule Check. Είναι μια σημαντική διαδικασία καθώς ελέγχει αν στην κατασκευή του ολοκληρωμένου κυκλώματος τηρούνται οι κανόνες που επιβάλλονται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε. Οι βασικοί τύποι ελέγχων που πραγματοποιούνται αφορούν έλεγχο διαστάσεων, αποστάσεων, σύνδεσης και επικαλύψεων.

Το σχέδιο μας πέρασε αυτό το τεστ με μηδενικά σφάλματα, δείχνοντας ότι το ολοκληρωμένο μας είναι κατασκευάσιμο.



LVS

Το δεύτερο τεστ που εκτελούμε είναι ο Έλεγχος Επιβεβαίωσης Διαμορφώσεων (Layout vs. Schematic). Εκτελεί την σύγκριση μεταξύ του φυσικού σχεδίου ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (layout) και του σχηματικού σχεδίου (schematic). Διασφαλίζει ότι το φυσικό σχέδιο είναι συμβατό με το σχηματικό, προστατεύοντας έτσι την ακρίβεια και την αξιοπιστία του τελικού κυκλώματος.

Το σχέδιο μας πέρασε επιτυχώς και αυτόν τον έλεγχο, εξασφαλίζοντας ότι τα στοιχεία που έχουν περιγραφεί στο σχηματικό σχέδιο υπάρχουν και έχουν την ίδια λειτουργικότητα.

