



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

# Σχεδιασμός Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων VLSI I

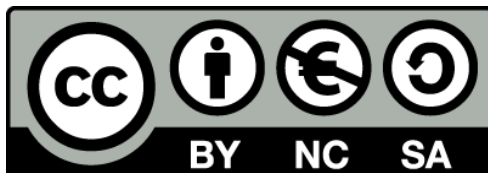
*3<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση*

**Μελέτη της Κατανάλωσης Ενέργειας και  
Φυσικός Σχεδιασμός Πυλών CMOS  
Πολύπλοκης Λογικής**

**ΑΝΟΙΚΤΑ** ακαδημαϊκά μαθήματα **ΠΠ**

## Άδειες Χρήσης

- Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

## Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη Δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

## Ανάπτυξη

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό αναπτύχθηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# 1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της άσκησης αυτής είναι η μελέτη ορισμένων σημαντικών χαρακτηριστικών των κυκλωμάτων τεχνολογίας CMOS που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας. Στο δεύτερο μέρος της άσκησης θα μελετηθεί ο σχεδιασμός στατικών κυκλωμάτων CMOS πολύπλοκης λογικής μέσω της μεθόδου των μονοπατιών Euler.

## 2 Συνιστώσες Κατανάλωσης Ενέργειας Κυκλωμάτων CMOS

### 2.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανάλωση Ενέργειας

Η ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα κύκλωμα CMOS αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

- **Στατική κατανάλωση** λόγω ρευμάτων διαρροής των στοιχείων
- **Δυναμική κατανάλωση** λόγω της φόρτισης και εκφόρτισης των χωρητικών φορτίων
- **Κατανάλωση βραχυκυκλώματος** λόγω του ρεύματος από την τροφοδοσία στην γη κατά τη διάρκεια της αλλαγής λογικής κατάστασης.

Η στατική κατανάλωση, η οποία είναι μικρή σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο συνιστώσες, προκαλείται κυρίως λόγω των διαρροών της αντίστροφης πόλωσης μεταξύ των περιοχών διάχυσης και υποστρώματος.

Η δυναμική κατανάλωση ενέργειας λόγω της φόρτισης ή της εκφόρτισης του χωρητικού φορτίου είναι η πιο σημαντική συνιστώσα στα στατικά κυκλώματα τεχνολογίας CMOS. Στον αντιστροφέα η ενέργεια αυτή στη διάρκεια ενός παλμού εισόδου δίνεται ως εξής:

$$E_D = C_L V^2$$

Προκύπτει λοιπόν ότι η συνιστώσα αυτή της κατανάλωσης είναι *ανεξάρτητη* από την κλίση της εισόδου και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του κυκλώματος. Η κατανάλωση ισχύος λόγω φόρτισης ή εκφόρτισης του χωρητικού φορτίου προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την ενέργεια με την συχνότητα μετάβασης του κυκλώματος.

$$P_D = C_L V^2 f_p$$

όπου  $f_p = 1/t_p$

Όταν η είσοδος έχει κάποια κλίση, τότε τα δύο στοιχεία του αντιστροφέα άγουν για μικρό χρονικό διάστημα ταυτόχρονα προκαλώντας ένα μικρό παλμό ρεύματος, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση βραχυκυκλώματος. Η κατανάλωση αυτή εξαρτάται από τον χρόνο μετάβασης της εισόδου, το χωρητικό φορτίο και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της πύλης. Στον αντιστροφέα τεχνολογίας CMOS η κατανάλωση ισχύος βραχυκυκλώματος στη διάρκεια ενός παλμού εισόδου δίνεται ως εξής:

$$P_{SC} = \frac{\beta}{2} (V_{DD} - 2V_t) \frac{3T_{in}}{t_p}$$

όπου  $\beta$  είναι το κέρδος των στοιχείων,  $V_{DD}$  η τάση τροφοδοσίας,  $V_t$  η τάση κατωφλίου των στοιχείων,  $T_{in}$  ο χρόνος μετάβασης της εισόδου και  $t_p$  η περίοδος του σήματος εισόδου. Η παραπάνω σχέση έχει προκύψει με την θεώρηση μηδενικού χωρητικού φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δίνει τη μέγιστη ενέργεια βραχυκυκλώματος, αφού όσο αυξάνεται το χωρητικό φορτίο η ενέργεια βραχυκυκλώματος μειώνεται. Αργοί χρόνοι εισόδου μπορεί να οδηγήσουν σε αρκετά σημαντική

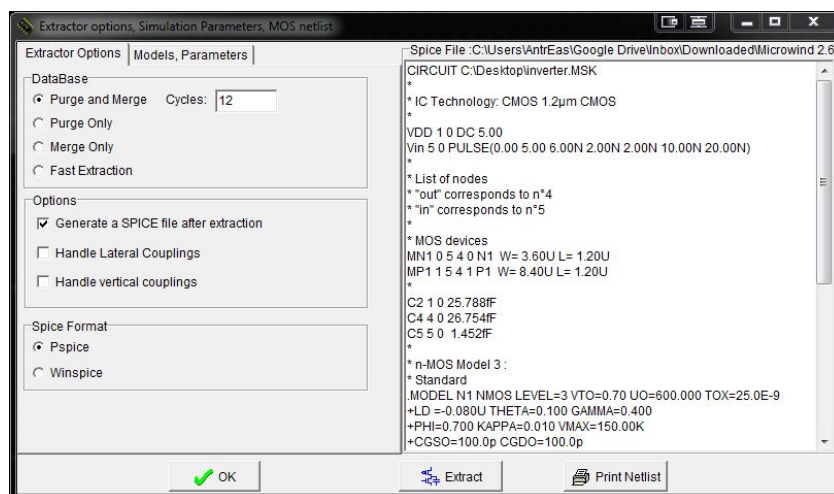
κατανάλωση βραχυκυκλώματος (20-30% της συνολικής κατανάλωσης). Επίσης το  $\beta$  εκφράζεται και ως:

$$\beta = \frac{\mu\epsilon W}{t_{ox} L} = K_p \frac{W}{L}$$

όπου  $K_p$  είναι ο συντελεστής κέρδους επεξεργασίας ή συντελεστής διαγωγιμότητας και στο πρόγραμμα Spice αναφέρεται ως KP.

## 2.2 Πειραματική Μελέτη Συνιστωσών Κατανάλωσης

- Σχεδιάστε έναν αντιστροφέα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:  $L_n = L_p = 2\lambda = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $W_n = 3,6 \mu\text{m}$  και  $W_p = 8,4 \mu\text{m}$ , πλάτος λωρίδων μετάλλου τροφοδοσίας και γείωσης  $3,6 \mu\text{m}$  και πλάτος διασυνδέσεων  $2,4 \mu\text{m}$ . Εφαρμόστε στην είσοδο του αντιστροφέα έναν παλμό με αρχικό χρόνο  $6 \text{ ns}$  στο μηδέν, χρόνους ανόδου και καθόδου  $2 \text{ ns}$  και χρόνο διάρκειας  $10 \text{ ns}$ .
- Για την ακριβή μέτρηση των ρευμάτων στους εσωτερικούς κόμβους του κυκλώματος θα χρησιμοποιηθεί ο προσομοιωτής PSpice, καθώς το Microwind δεν παρέχει αυτήν τη δυνατότητα. Έτσι, πρέπει να παραχθεί η ισοδύναμη περιγραφή του κυκλώματος στη μορφή που απαιτείται από το PSpice. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί επιλέγοντας την εντολή “Convert Into...” → “Spice Netlist” από την καρτέλα “File”, έτσι εμφανίζεται το παράθυρο του Σχ. 1.



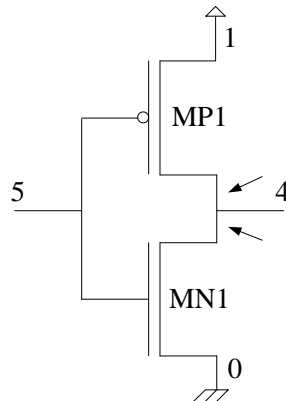
Σχ. 1 Παράθυρο εξαγωγής κυκλώματος Spice

Πατώντας το πλήκτρο “Extract” παράγεται ένα αρχείο που περιέχει την περιγραφή του κυκλώματος καθώς και πληροφορίες για τις διεγέρσεις που έχουν τεθεί. Η κατάληξη του αρχείου είναι .CIR.

- Από τον κατάλογο προγραμμάτων ανοίξτε το PSpice AD και εισάγετε το κύκλωμα μέσω της εντολής “File” → “Open”.

Η μέτρηση του ρεύματος σε έναν κόμβο του κυκλώματος πραγματοποιείται μέσω της εισαγωγής πηγών μηδενικής τάσης στο συγκεκριμένο σημείο και παρατήρησης του ρεύματος που τη διαρρέει. Έτσι, για τη μέτρηση του ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του χωρητικού φορτίου εξόδου καθώς και του ρεύματος βραχυκυκλώματος πρέπει να εισαχθούν δύο πηγές μηδενικής τάσης στα σημεία που

δείχνουν τα βέλη του Σχ. 2. Οι δείκτες των κόμβων του συγκεκριμένου σχήματος προκύπτουν από το αντίστοιχο Spice ισοδύναμο κύκλωμα και συγκεκριμένα από τις γραμμές όπου περιγράφεται η αντιστοίχιση των κόμβων και η διασύνδεση των τρανζίστορ.



Σχ. 2 Σημεία εισαγωγής πηγών μηδενικής τάσης

Η αντιστοίχιση των κόμβων εισόδου και εξόδου στους αντίστοιχους αριθμούς του Σχ. 2 φαίνεται από τις ακόλουθες γραμμές:

- \* List of nodes
- \* "out" corresponds to n°4
- \* "in" corresponds to n°5

Επίσης, οι διεγέρσεις που έχουν εισαχθεί στο κύκλωμα και η διασύνδεσή τους φαίνονται από τις εξής γραμμές:

```
VDD 1 0 DC 5.00
Vin 5 0 PULSE(0.00 5.00 6.00N 2.00N 2.00N 10.00N 20.00N)
```

Η δήλωση των πηγών τάσης ακολουθεί την εξής δομή:

***LABEL NODE+ NODE- TYPE VALUE***

όπου *LABEL* είναι η ονομασία της πηγής, *NODE+* και *NODE-* η ετικέτα που δηλώνει τη σύνδεση του θετικού και αρνητικού ακροδέκτη, αντίστοιχα, *TYPE* ο τύπος της πηγής και *VALUE* οι χαρακτηριστικές τιμές της ανάλογα με τον τύπο της. Από την παραπάνω δήλωση γίνεται σαφές ότι ο κόμβος που δηλώνεται με τον αριθμό 1 αποτελεί τον θετικό ακροδέκτη της πηγής τάσης τροφοδοσίας, ενώ ο κόμβος 0 αποτελεί τον ακροδέκτη γείωσης.

Η διασύνδεση των τρανζίστορ φαίνεται στην περιοχή δήλωσης των MOS στοιχείων:

```
* MOS devices
MN1 0 5 4 0 N1 W= 3.60U L= 1.20U
MP1 1 5 4 1 P1 W= 8.40U L= 1.20U
```

Η δήλωση των στοιχείων ακολουθεί την εξής δομή:

***LABEL SOURCE GATE DRAIN SUBSTRATE***

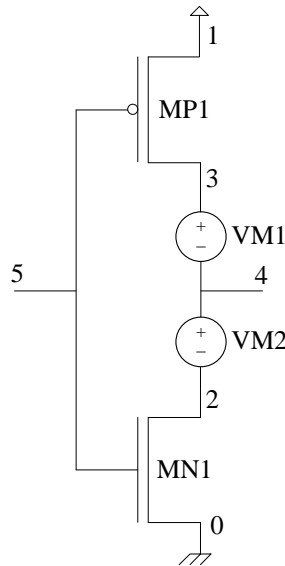
όπου *LABEL* είναι η ετικέτα του στοιχείου και οι υπόλοιπες μεταβλητές δηλώνουν τον κόμβο με τον οποίο συνδέεται ο αντίστοιχος ακροδέκτης του τρανζίστορ.

Τέλος, με την εντολή *.TRAN* που υπάρχει στο *.CIR* αρχείο μπορεί να μεταβληθεί το χρονικό διάστημα προσομοίωσης του κυκλώματος. Η εντολή αυτή ακολουθεί τον εξής τρόπο δήλωσης:

### .TRAN STEP TIME

όπου *STEP* το βήμα της προσομοίωσης και *TIME* η διάρκειά της.

- d) Ακολουθώντας τον παραπάνω τρόπο δήλωσης, τροποποιείτε το Spice μοντέλο του κυκλώματος ώστε να εισάγετε δύο πηγές μηδενικής DC τάσης στα σημεία που δείχνουν τα βέλη του Σχ. 2 παράγοντας το κύκλωμα του Σχ. 3. Επίσης μεταβάλλετε τον χρόνο προσομοίωσης σε 30 ns.



Σχ. 3 Αντιστροφέας με πηγές μηδενικής τάσης

- e) Εκτελέστε την προσομοίωση επιλέγοντας την εντολή “Run” από την καρτέλα “Simulate”. Η εισαγωγή των κυματομορφών πραγματοποιείται επιλέγοντας την εντολή “Add Trace...” από την καρτέλα “Trace”. Αρχικά παρατηρείστε τα ρεύματα τα  $I(VM1)$  και  $I(VM2)$  των πηγών μηδενικής τάσης και στη συνέχεια την κατανάλωση στον κόμβο εξόδου  $W(C4)$ .
- f) Αυξήστε το φορτίο εξόδου στα 300 fF, μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα του κόμβου εξόδου (C4), και παρατηρείστε τη μεταβολή των ρευμάτων και της κατανάλωσης στον συγκεκριμένο κόμβο.
- g) Μεταβάλλετε τους χρόνους ανόδου και καθόδου της κυματομορφής εισόδου σε 4 ns και παρατηρείστε τη μεταβολή των ρευμάτων των πηγών.

## 3 Φυσικός Σχεδιασμός Πολύπλοκων Λογικών Συναρτήσεων

### 3.1 Σχεδιασμός Κυκλωμάτων Σύνθετης Λογικής με Μονοπάτια Euler

Οι στατικές πύλες τεχνολογίας CMOS σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας ένα πλήθος στοιχείων τύπου N μαζί με ένα πλήθος στοιχείων τύπου P που είναι κατάλληλα ευθυγραμμισμένα έτσι ώστε να υπάρχουν κοινές συνδέσεις πύλης. Μια από τις τεχνικές που αυτοματοποιούν το σχεδιασμό πυλών πολύπλοκης λογικής είναι αυτή που χρησιμοποιεί τα μονοπάτια Euler, με την οποία μπορεί να

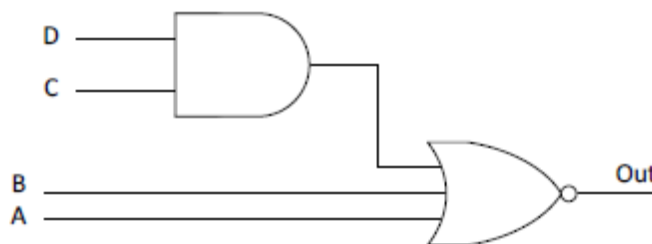
επιτευχθεί ο σχεδιασμός μιας πύλης κατά συνεχή τρόπο. Επίσης, η τεχνική αυτή επιτρέπει έναν πιο αποδοτικό τρόπο σχεδιασμού, καθώς, με την κατάλληλη επιλογή των μονοπατιών, οι πύλες μπορούν να έχουν περισσότερες κοινές περιοχές διάχυσης.

Για να βρεθούν τα μονοπάτια Euler σε ένα κύκλωμα CMOS θα πρέπει αυτό να σχεδιαστεί σε επίπεδο τρανζίστορ τύπου N και P. Σημειώνεται ότι η μετάβαση από έναν σχεδιασμό σε επίπεδο πυλών στον αντίστοιχο σε επίπεδο τρανζίστορ είναι εφικτό σε συναρτήσεις συμπληρωματικής λογικής, δηλαδή όταν  $Out = \bar{Q}$ , όπου Q η σύνθετη λογική έκφραση. Στην περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, υλοποιείται η συμπληρωματική έκφραση της Out και εισάγεται ένας αντιστροφέας ώστε να παραχθεί το σωστό αποτέλεσμα της σύνθετης συνάρτησης.

Μονοπάτι Euler είναι μια ακολουθία στοιχείων το οποίο περιλαμβάνει όλες τις εισόδους πυλών στο λογικό δένδρο τύπου N ή P, έτσι ώστε η καθεμία να εμφανίζεται μόνο μια φορά. Για να σχεδιαστεί μια πύλη πολύπλοκης λογικής κατά συνεχή τρόπο θα πρέπει να βρεθεί ένα μονοπάτι Euler στο λογικό δένδρο τύπου N που να έχει ταυτόσημη ακολουθία ονομάτων με ένα μονοπάτι Euler του λογικού δένδρου τύπου P. Αυτό ορίζει τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα τρανζίστορ κατά τον φυσικό σχεδιασμό της πύλης. Η διαδικασία σχεδιασμού με τη βοήθεια των μονοπατιών Euler επεξηγείται με το ακόλουθο παράδειγμα.

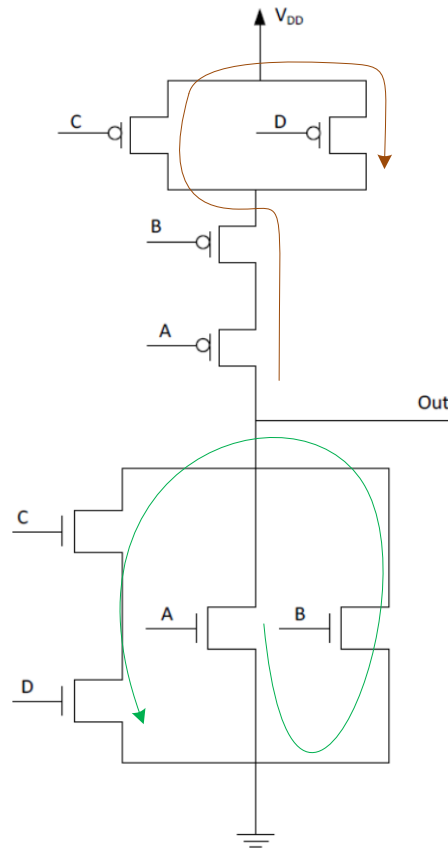
#### Παράδειγμα:

Στο Σχ. 4 δίνεται το διάγραμμα σε επίπεδο λογικών πυλών του κυκλώματος που υλοποιεί τη λογική συνάρτηση  $Out = \overline{(A+B+CD)}$



Σχ. 4 Υλοποίηση λογικής συνάρτησης σε επίπεδο πυλών

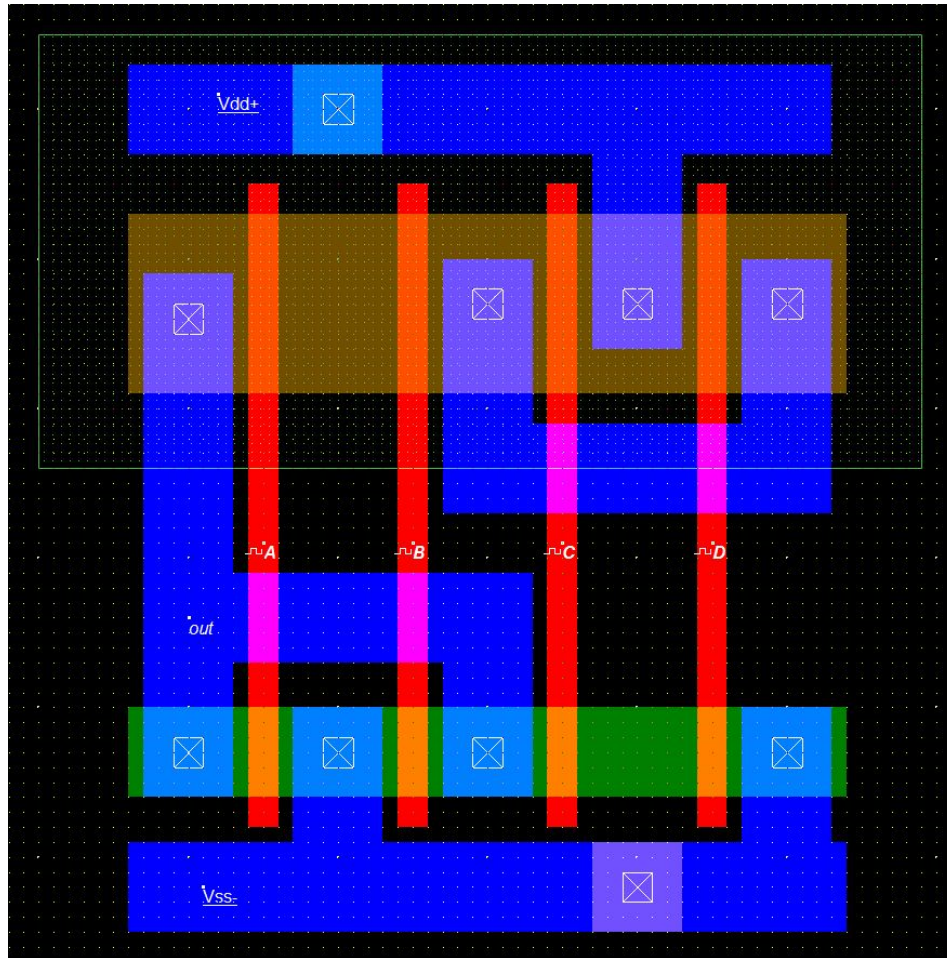
Το πρώτο βήμα να γίνει είναι η παραγωγή του κυκλωματικού διαγράμματος σε επίπεδο τρανζίστορ. Στο λογικό δένδρο N τύπου η λογική λειτουργία OR (+) υλοποιείται με παράλληλη σύνδεση των τρανζίστορ, ενώ η λογική λειτουργία AND υλοποιείται με σειριακή σύνδεση των τρανζίστορ. Το λογικό δένδρο τύπου P είναι το δυϊκό του λογικού δένδρου τύπου N. Ακολουθώντας λοιπόν τους παραπάνω κανόνες παράγεται το ο σχεδιασμός του Σχ. 5. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ένα μονοπάτι Euler στο συγκεκριμένο κυκλωματικό διάγραμμα είναι το εξής: A B C D. Παρατηρείστε ότι η ακολουθία στοιχείων είναι κοινή για τα δικτύματα τύπου N και P. Στην περίπτωση που μία κοινή ακολουθία δεν μπορεί να βρεθεί, είναι αναγκαίος ο επανασχεδιασμός του κυκλωματικού διαγράμματος.



Σχ. 5 Υλοποίηση λογικής συνάρτησης σε επίπεδο τρανζίστορ

Το πρώτο βήμα του φυσικού σχεδιασμού της πύλης είναι η τοποθέτηση κάθετων λωρίδων πολυκρυσταλλικού πυριτίου σύμφωνα με την ακολουθία του κοινού μονοπατιού που βρέθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια τοποθετούνται οι δύο παράλληλες περιοχές διάχυσης τύπου N και P, οι οποίες τέμνουν κάθετα τις λωρίδες πολυκρυσταλλικού πυριτίου, έτσι ώστε να δημιουργηθούν τα τρανζίστορ της πύλης. Το επόμενο βήμα είναι ο σχεδιασμός των λωρίδων μετάλλου της τροφοδοσίας και της γείωσης. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε την περιοχή του “πηγαδιού” τύπου n η οποία περικλείει τα τρανζίστορ τύπου p. Με βάση την συνδεσμολογία των τρανζίστορ που φαίνεται στο κυκλωματικό διάγραμμα σχεδιάζουμε τις διασυνδέσεις της πύλης χρησιμοποιώντας λωρίδες μετάλλου. Η σύνδεση των λωρίδων μετάλλου με τις περιοχές διάχυσης γίνεται μέσω των αντίστοιχων επαφών που μας παρέχει η βιβλιοθήκη βασικών στοιχείων του εργαλείου. Για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός της πύλης πολώνουμε το πηγάδι τύπου N και το υπόστρωμα τύπου N με τις κατάλληλες επαφές, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.

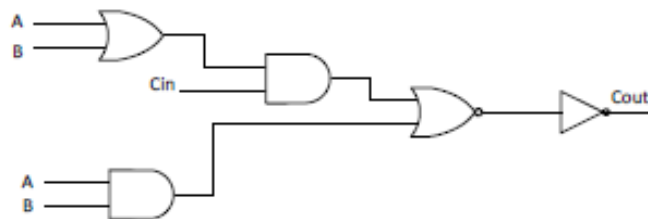




Σχ. 6 Υλοποίηση λογικής συνάρτησης σε φυσικό επίπεδο

### 3.2 Πειραματική Μελέτη Φυσικού Σχεδιασμού με Euler Paths

- a) Στο Σχ. 7 δίνεται το διάγραμμα σε επίπεδο λογικών πυλών του κυκλώματος που παράγει το κρατούμενο σε έναν πλήρη αθροιστή. Να παραχθεί η λογική συνάρτηση που υλοποιεί το κύκλωμα αυτό και στη συνέχεια να σχεδιαστεί το κυκλωματικό διάγραμμα σε επίπεδο στοιχείων τύπου  $n$  και  $p$ , έτσι ώστε να είναι δυνατός ο φυσικός του σχεδιασμός κατά συνεχή τρόπο (δηλαδή σε μια βαθμίδα και έναν αντιστροφέα).



Σχ. 7 Υλοποίηση συνάρτησης υπολογισμού κρατούμενου σε επίπεδο πυλών

- b) Βρείτε ένα μονοπάτι Euler και σχεδιάστε το κύκλωμα παραγωγής του κρατούμενου χρησιμοποιώντας τα εξής χαρακτηριστικά:  $L_n = L_p = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $W_n = 3,6 \mu\text{m}$ ,  $W_p = 8,4 \mu\text{m}$ , πλάτος λωρίδων τροφοδοσίας και γείωσης  $3,6 \mu\text{m}$  και πλάτος διασυνδέσεων  $2,4 \mu\text{m}$ .

- c) Μετρείστε τις χωρητικότητες εισόδου και εξόδου του κυκλώματος και την καθυστέρηση του παραπάνω κυκλώματος από την είσοδο  $C_{in}$  στην έξοδο. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιείτε διαδοχικούς παλμούς στην είσοδο  $C_{in}$  με χρόνους ανόδου και καθόδου 2 ns, χρόνο διάρκειας 7 ns και αρχικό χρόνο 2 ns και εφαρμόστε σταθερές στάθμες στις υπόλοιπες δύο εισόδους ( $B = 5\text{ V}$ ,  $A = 0\text{ V}$ ).
- d) Προσθέστε στο PSpice ισοδύναμο του κυκλώματος τις κατάλληλες πηγές μηδενικής τάσης, έτσι ώστε να μετρήσετε τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης του εσωτερικού κόμβου και της συνολικής εξόδου, καθώς και τα ρεύματα βραχυκυκλώματος στο κύκλωμα που σχεδιάστηκε.

## 4 Ερωτήσεις

### 4.1 Μελέτη Συνιστωσών Κατανάλωσης

- Σχεδιάστε μια πύλη NOR τριών εισόδων με τα εξής χαρακτηριστικά:  $L_n = L_p = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $W_n = 3,6 \mu\text{m}$ ,  $W_p = 8,4 \mu\text{m}$ , πλάτος λωρίδων μετάλλου τροφοδοσίας και γείωσης  $3,6 \mu\text{m}$  και πλάτος διασυνδέσεων  $2,4 \mu\text{m}$ . Εφαρμόστε σε όλες τις εισόδους της πύλης έναν παλμό με αρχικό χρόνο  $3 \text{ ns}$ , χρόνους ανόδου και καθόδου  $2 \text{ ns}$  και διάρκεια  $12 \text{ ns}$ .
- Μετρήστε κατά προσέγγιση την ενέργεια βραχυκυκλώματος και την ενέργεια που καταναλώνεται λόγω του χωρητικού φορτίου στην έξοδο κατά τη διάρκεια ενός παλμού εισόδου με τη βοήθεια πηγών μηδενικής τάσης.
- Επαναλάβετε τη μέτρηση και των δύο τύπων κατανάλωσης ενέργειας θέτοντας παλμό μόνο στη μία είσοδο της πύλης, ενώ στις υπόλοιπες σταθερές στάθμες. Πού οφείλεται η ενδεχόμενη αλλαγή στις τιμές των ενεργειών που μετρήθηκαν;

### 4.2 Σχεδιασμός Πυλών Σύνθετης Λογικής

- Σχεδιάστε σε επίπεδο λογικών πυλών μία πύλη XOR ως  $(x+y)(x'y')$ . ώστε να είναι δυνατή η υλοποίησή της στο φυσικό επίπεδο με τη βοήθεια των μονοπατιών Euler.
- Σχεδιάστε σε επίπεδο τρανζίστορ την παραπάνω πύλη. Στη συνέχεια επιλέξτε τα κατάλληλα μονοπάτια Euler και σχεδιάστε την πύλη στο φυσικό επίπεδο.
- Συνδυάστε δύο πύλες XOR και σχεδιάστε το κύκλωμα υπολογισμού του αθροίσματος σε έναν πλήρη αθροιστή  $S = A \oplus B \oplus C_{in}$ .

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Γεώργιος Θεοδωρίδης, Οδυσσέας Κουφοπαύλου,  
«Σχεδιασμός Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (VLSI) I»  
Έκδοση: 1.0 Πάτρα 2015  
Διαθέσιμο στη διαδικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE891/>

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ