



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Ενότητα Α: Τεχνολογία Σχεδίασης Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων
Κεφάλαιο 5: Μικρολιθογραφία

Αραπογιάννη Αγγελική

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

1. Σκοποί ενότητας	4
2. Περιεχόμενα ενότητας.....	4
3. Κατασκευή των масκών.....	5
3.1 Η κατασκευή του προτύπου 10X	5
3.2 Η “εκτύπωση” των масκών	8
4. Η Φωτολιθογραφία	8

1. Σκοποί ενότητας

Στο πρώτο μέρος, αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες και οι τεχνικές φυσικού σχεδιασμού και κατασκευής των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων σε 5 υπό-ενότητες. Η πέμπτη υπό-ενότητα περιγράφει τη λιθογραφία και τη διαδικασία και τα στάδια της φωτολιθογραφίας.

2. Περιεχόμενα ενότητας

Η λιθογραφία, όπως χρησιμοποιείται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι η διαδικασία μεταφοράς γεωμετρικών σχημάτων από μία μάσκα στην επιφάνεια του πυριτίου. Τα σχήματα αυτά αποτελούν τα διάφορα τμήματα του κυκλώματος, όπως ηλεκτρόδια πύλης, παράθυρα επαφών, μεταλλικές συνδέσεις κ. ά.

Όταν ολοκληρωθεί το δοκιμαστικό κύκλωμα ή η εξομίωσή του με υπολογιστή, το πρώτο βήμα στην κατασκευή ενός Ο.Κ. είναι να φτιαχτεί το γεωμετρικό σχέδιο των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος (layout). Στη συνέχεια, το σύνθετο σχέδιο του κυκλώματος χωρίζεται σε στάθμες που αντιστοιχούν στις διαδοχικές διαδικασίες κατασκευής του Ο.Κ. π.χ. μία στάθμη για τα ηλεκτρόδια πύλης, μία άλλη στάθμη για τα παράθυρα των επαφών κ.ο.κ. Οι στάθμες αυτές ονομάζονται στάθμες μασκών. Κατόπιν το γεωμετρικό σχέδιο κάθε στάθμης μεταφράζεται σε ψηφιακά δεδομένα με τη βοήθεια π.χ. μιας οθόνης αλληλεπίδρασης και ενός ψηφιοποιητή. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν μία γεννήτρια μορφών (pattern generator) ελεγχόμενη από υπολογιστή.

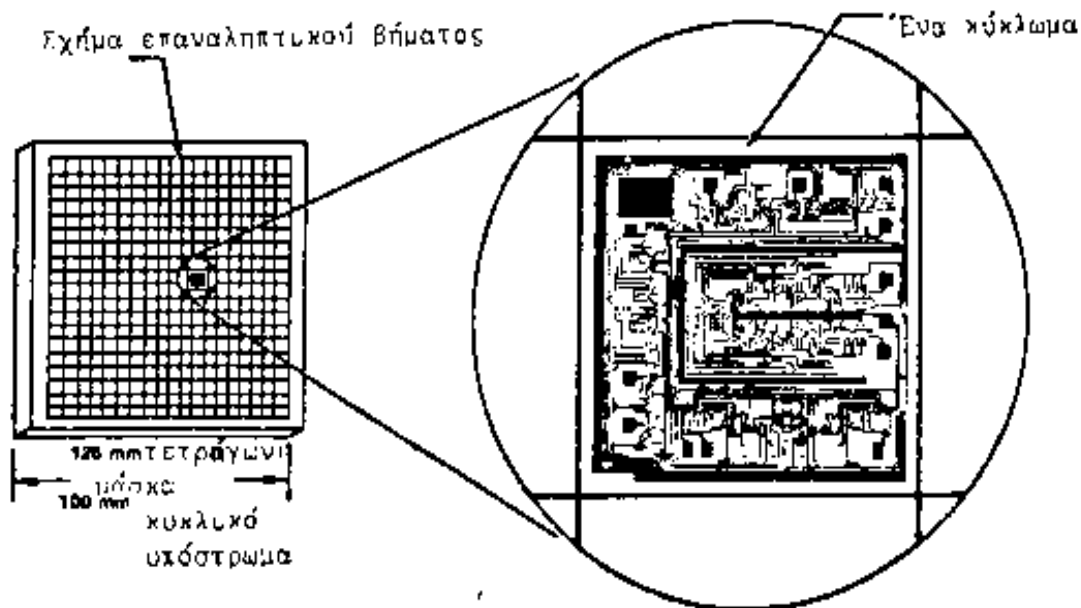
Η γεννήτρια μορφών είναι συχνά μία συσκευή παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων που μπορεί να μεταφέρει τις μορφές του σχεδίου απ' ευθείας στην επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου αλλά πιο συχνά τις μεταφέρει πάνω σε φωτοευαίσθητοποιημένες πλάκες από γυαλί που ονομάζονται μάσκες ή φωτομάσκες. Οι μητρικές αυτές μάσκες χρησιμοποιούνται είτε για τη μεταφορά των μορφών απ' ευθείας πάνω στο υπόστρωμα του πυριτίου, είτε για την παραγωγή άλλων μασκών, τις οποίες ονομάζουμε μάσκες εργασίας.

Η μεταφορά των μορφών από τη μάσκα στο υπόστρωμα πυριτίου συνήθως χρησιμοποιεί μία φωτογραφική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία το υπόστρωμα καλύπτεται από ένα φωτοευαίσθητο υλικό, ανθεκτικό στα οξέα (που ονομάζεται φωτοαντιστατικό) και εκτίθεται σε κατάλληλο φως μέσα από τη μάσκα. Ακολουθεί εμφάνιση του φωτοαντιστατικού και δημιουργία παραθύρων μέσα από τα οποία θα γίνει η χάραξη του λεπτού στρώματος που βρίσκεται κάτω από το φωτοαντιστατικό. Το λεπτό αυτό στρώμα μπορεί να είναι διοξείδιο του πυριτίου ή νιτρίδιο του πυριτίου που θα χρησιμοποιηθεί σαν μάσκα π.χ. για τη διάχυση προσμίξεων στο πυρίτιο, ή μπορεί να είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ή στρώμα μετάλλου για το σχηματισμό των διασυνδέσεων του κυκλώματος.

Η όλη διαδικασία της φωτολιθογραφίας είναι ουσιώδης για τη μικροηλεκτρονική. Η ακριβής μεταφορά γραμμών πάχους μέχρι 4μ είναι υπόθεση ρουτίνας στην παραγωγή Ο.Κ. με χρήση πολυμερών φωτοαντιστατικών ευαίσθητων στις υπεριώδεις ακτινοβολίες και με τη χρήση μασκών που έχουν κατασκευαστεί με φωτολιθογραφικές μεθόδους. Εξ άλλου σήμερα μπορούν να πραγματοποιηθούν υπομικρονικά σχήματα με τη χρήση υλικών ευαίσθητων στις δέσμες ηλεκτρονίων ή στις μαλακές ακτίνες Χ.

Όπως ήδη αναφέραμε, για την κατασκευή ενός πλήρους κυκλώματος απαιτούνται πολλές στάθμες μασκών. Ωστόσο, η κάθε μάσκα μπορεί να περιέχει 100 και πλέον ταυτόσημα σχήματα κυκλωμάτων,

πράγμα που επιτρέπει την ταυτόχρονη κατασκευή μεγάλου αριθμού Ο.Κ. (τσιπς) πάνω στο ίδιο υπόστρωμα (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5. 1: Παράδειγμα μιας φωτομάσκας

3. Κατασκευή των μασκών

Ο μετασχηματισμός ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος από το συμβολικό διάγραμμα σε μικροκύκλωμα είναι μία πολύπλοκη διαδικασία. Τυπικά το πρώτο στάδιο καταλήγει στην κατασκευή ενός προτύπου (reticle) σε μέγεθος δεκαπλάσιο (10X) του τελικού Ο.Κ. Από το πρότυπο αυτό θα κατασκευαστεί με επαναληπτικά βήματα η μητρική μάσκα -στις τελικές διαστάσεις- και από αυτήν θα κατασκευαστούν οι μάσκες εργασίας.

3.1 Η κατασκευή του προτύπου 10X

Υπάρχουν δύο μέθοδοι εργασίας που καταλήγουν στην κατασκευή του προτύπου της κάθε μάσκας. Η πρώτη μέθοδος είναι η μέθοδος κατασκευής ενός μεγεθυμένου αναπτύγματος και είναι η παλαιότερη. Η δεύτερη μέθοδος είναι η σύγχρονη μέθοδος εργασίας και βασίζεται στη σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD).

α) Το ανάπτυγμα (layout)

Σ' αυτή τη μέθοδο εργασίας το πρώτο βήμα είναι η σχεδίαση ενός σύνθετου αναπτύγματος μεγάλης κλίμακας του συνόλου των μασκών. Το μέγεθος του αναπτύγματος αυτού είναι τυπικά 100X ως 200X το μέγεθος του τελικού κυκλώματος και αυξάνει καθώς η πολυπλοκότητα του κυκλώματος μεγαλώνει και τα πλάτη των γραμμών μειώνονται.

Το σύνθετο αυτό ανάπτυγμα πρέπει στη συνέχεια να μεταφερθεί κατά επίπεδο σε κάποιο ειδικό υλικό για να σχηματιστούν τα μεγεθυμένα πρότυπα των μασκών. Μία απλή, ανέξοδη και ευέλικτη τεχνική είναι να χαραχθεί το σχέδιο πάνω σε ένα ειδικό κόκκινο πλαστικό φύλλο (ULANO Rubylith) με τη βοήθεια μιας χειροκίνητης τράπεζας σχεδιασμού. Στη συνέχεια το πλαστικό απομακρύνεται με το χέρι από τα σημεία όπου τα σχήματα πρέπει ν' αφήνουν το φως να περνάει και παραμένει εκεί όπου το σχήμα πρέπει να είναι αδιαφανές.

Η χάραξη του πλαστικού μπορεί να αυτοματοποιηθεί από έναν ψηφιοποιητή, ο οποίος μετατρέπει την πληροφορία του σχήματος σε ψηφιακό σήμα, με το οποίο ελέγχει μία μηχανή αυτόματης κοπής. Και μ' αυτή τη μέθοδο όμως η απομάκρυνση του κομμένου πλαστικού πρέπει να γίνει με το χέρι, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα όταν το σχήμα είναι πολύπλοκο.

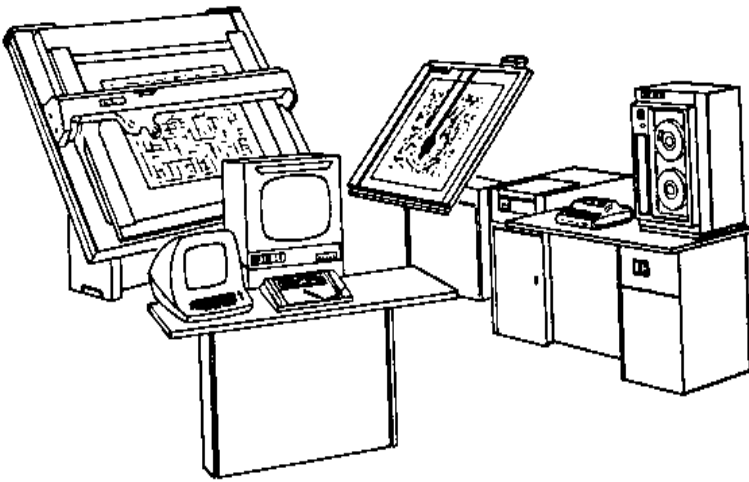
Μία εναλλακτική μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθεί η έξοδος του ψηφιοποιητή για τον έλεγχο ενός φωτοσχεδιαστή μεταβλητού ανοίγματος, ο οποίος προβάλλει το σχήμα πάνω σε ένα φωτοευαίσθητο φιλμ ή πλάκα. Αυτή η τεχνική είναι πιο ακριβής και πραγματοποιείται συνήθως σε κλίμακα 100X το τελικό μέγεθος.

Το επόμενο βήμα μετά την κατασκευή του μεγενθυμένου αναπτύγματος των μασκών είναι μία φωτογραφική σμίκρυνση σε ένα πρότυπο με διαστάσεις 10X το τελικό μέγεθος. Η κάμερα για μία τέτοια σμίκρυνση πρέπει να ικανοποιεί αρκετά αυστηρές απαιτήσεις: Ο φακός πρέπει να διορθωθεί από παραμορφώσεις, πρέπει να έχει μεγάλη διακριτική ικανότητα (σε αριθμό γραμμών ανά mm) και μεγάλο χρήσιμο οπτικό πεδίο. Όλες αυτές οι απαιτήσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κάμερας τεραστίων διαστάσεων. Εξ άλλου η κάμερα αυτή πρέπει να είναι ισχυρά αναρτημένη σε μία βάση ελεύθερη δονήσεων. Το περιβάλλον της κάμερας πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά και το ανάπτυσμα του σχήματος από πλαστικό συνήθως παράγεται και διατηρείται στο ίδιο μέρος ώστε να αποφευχθούν παραμορφώσεις λόγω θερμότητας και υγρασίας. Το σχήμα, σ' αυτές τις κάμερες, φωτίζεται από πίσω από μία πηγή διάχυτου φωτός, που συνήθως φιλτράρεται ώστε να είναι μονοχρωματικό, πράσινο. Για τα Ο.Κ. μεγάλης κλίμακας μπορεί να χρειαστεί να γίνουν δύο σμικρύνσεις ή να γίνουν σμικρύνσεις κατά τμήματα και να φωτοσυντεθεί το ολικό σχήμα.

Η τεχνική αυτή που χρησιμοποιεί μεγενθυμένα αρχικά αναπτύγματα είναι προς το παρόν μία βιώσιμη τεχνική κυρίως λόγω της απλότητας της διαδικασίας και του σημαντικού κεφαλαίου που έχει επενδυθεί για εξοπλισμό. Υπάρχουν όμως δυσκολίες ειδικά για τα πυκνά Ο.Κ. μεγάλης κλίμακας (LSI και VLSI). Οι δυσκολίες αυτές οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων μεθόδων για την κατασκευή των προτύπων σχημάτων των μασκών της μικροηλεκτρονικής.

β) Σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (CAD)

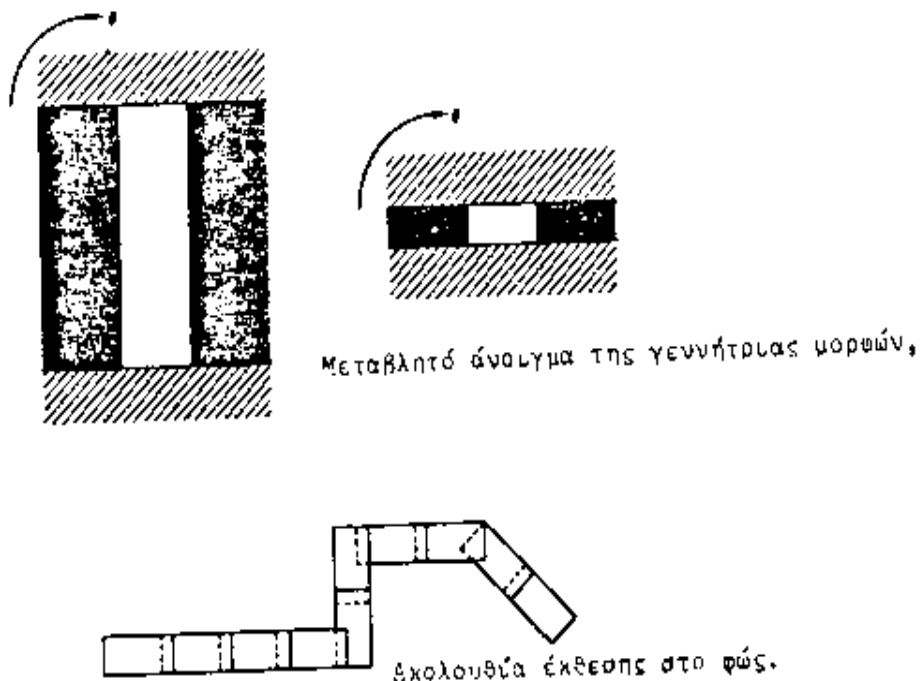
Η διάδοση της χρήσης των υπολογιστών οδήγησε στη δημιουργία μιας νέας τεχνικής για την κατασκευή του αρχικού αναπτύγματος των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ένα τυπικό σύστημα σχεδίασης Ο.Κ. με υπολογιστή φαίνεται στο σχήμα 5.2. Ο χειριστής της μονάδας σχεδίασης φτιάχνει την εικόνα του αρχικού τρανζίστορ με βάση τις διαστάσεις που έχει υπολογίσει ο σχεδιαστής του Ο.Κ., χρησιμοποιώντας μία τεχνική δημιουργίας μοντέλων με υπολογιστή. Αφού σχηματιστεί η εικόνα του ενός τρανζίστορ, ψηφιοποιείται με την εισαγωγή των Χ-Υ συντεταγμένων των τομών των διαφόρων γραμμών κτλ. μέσα στον υπολογιστή με τη βοήθεια του πληκτρολογίου. Όταν το πρώτο αυτό κύτταρο τρανζίστορ μπει στον υπολογιστή, μπορεί να επαναληφθεί και να συνδεσμολογηθεί σύμφωνα με το σχέδιο του Ο.Κ. σε μία τερματική οθόνη. Αν και η σχεδίαση στην πραγματικότητα είναι εξαιρετικά πολύπλοκη ακόμη και με τον υπολογιστή, στο τέλος το πλήρες σχέδιο του κυκλώματος θα υπάρχει μέσα στον υπολογιστή. Όταν ο σχεδιαστής βεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν λάθη, αφού γίνουν εκτεταμένοι έλεγχοι και εξομοιώσεις του κυκλώματος, η ψηφιακή εικόνα κάθε στάθμης, που θα αποτελέσει το πρότυπο της αντίστοιχης μάσκας, βγαίνει σε μαγνητική ταινία.



Σχήμα 5. 2:Τυπικό σύστημα CAD.

Η ταινία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο είτε ενός φωτο-εγγραφέα για τη δημιουργία σχημάτων 100X το τελικό μέγεθος, είτε μιας γεννήτριας μορφών σε μέγεθος 10X το τελικό, είτε ενός συστήματος λιθογραφίας με δέσμη ηλεκτρονίων για τη δημιουργία σχημάτων με μέγεθος 1X το τελικό.

Η γεννήτρια μορφών (pattern generator) που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των προτύπων των μασκών σε μέγεθος 10X το τελικό είναι μία προηγμένη μορφή του φωτοεγγραφέα που αναφέρθηκε πιο πάνω. Οι μορφές σχηματίζονται συνήθως πάνω σε φωτογραφική πλάκα με τη χρήση ενός μεταβλητού ορθογωνίου ανοίγματος και μιας λάμπας. Οι καμπύλες μπορούν να σχηματιστούν με διαδοχικές εκθέσεις στρεφομένων ορθογώνιων (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5. 3: Δημιουργία μορφών του προτύπου.

Η διακριτική ικανότητα θέσης της βαθμίδας είναι τυπικά 0.6μm. Το μέγεθος του ανοίγματος μπορεί να ρυθμιστεί με βήματα 1μm από 4μm ως 3000μm και το εμβαδόν που μπορεί να εκτεθεί είναι

1,5X1,5cm. Η ακρίβεια των προτύπων 10X που παράγονται μ' αυτές τις γεννήτριες μορφών είναι ανώτερη από αυτή που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της χάραξης του πλαστικού φύλλου με μέγεθος 200X το τελικό.

Έχουν σχεδιαστεί γεννήτριες μορφών που εργάζονται στο τελικό μέγεθος, είτε για την κατασκευή των τελικών μασκών είτε για την απ' ευθείας αποτύπωση του σχήματος πάνω στο υπόστρωμα του ημιαγωγού. Οι γεννήτριες αυτές μορφών χρησιμοποιούν πηγές δέσμης ηλεκτρονίων. Η απ' ευθείας έκθεση πάνω στο υπόστρωμα είναι μία χρονοβόρα διαδικασία και χρησιμοποιείται μόνο όταν η ακρίβεια και τα πλάτη των γραμμών που απαιτούνται δεν μπορούν να επιτευχθούν με άλλη μέθοδο.

3.2 Η “εκτύπωση” των μασκών

Το σετ των μητρικών μασκών στο τελικό μέγεθος κατασκευάζεται από τα πρότυπα σε μέγεθος 10X το τελικό, που είδαμε πιο πάνω, με ένα σύστημα στο οποίο η εικόνα εκτίθεται πολλές φορές πάνω σε μία πλάκα που μετακινείται μηχανικά κατά βήματα.

Το υλικό των μητρικών μασκών μπορεί να είναι είτε φωτογραφική πλάκα είτε πλάκα σκληρής επιφάνειας (γυαλί με επίστρωση π.χ. χρωμίου).

Για να είμαστε βέβαιοι ότι το κάθε κύκλωμα θα συμπίπτει σε όλες τις στάθμες μασκών, επιθυμούμε να κατασκευάζουμε όλο το σετ των μασκών ταυτόχρονα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας κάμερας επαναληπτικού βήματος πολλαπλού βαρελιού. Σ' αυτό το σύστημα, ένα πρότυπο μάσκας τοποθετείται σε κάθε βαρέλι και αντιστοιχεί σε μία στάθμη μάσκας. Οι πλάκες που πρόκειται να εκτεθούν τοποθετούνται στο ίδιο τραπέζι ώστε να εκτίθενται και να μετακινούνται ταυτόχρονα. Σε συμμετρικές θέσεις επάνω στις μάσκες τοποθετούνται ειδικοί σχηματισμοί δοκιμών για τον έλεγχο της διαδικασίας. Αυτοί χρησιμοποιούνται και για να διευκολυνθεί η ευθυγράμμιση των διαφόρων σταθμών των μασκών πάνω στο υπόστρωμα του ημιαγωγού. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου πολλαπλού βαρελιού είναι ότι αν εμφανιστεί μία βλάβη σε μία από τις μάσκες ενός πολύπλοκου σετ, είναι απαραίτητο να ξαναγίνει όλο το σετ των μασκών.

Αφού φτιαχτεί η μητρική μάσκα, κατασκευάζονται εύκολα τα σετ των μασκών εργασίας. Οι μάσκες εργασίας μπορεί να είναι και πάλι είτε φωτογραφικές πλάκες είτε πλάκες σκληρής επιφάνειας. Αυτές μπορούν να φτιαχτούν είτε με επαφή είτε με προβολή 1:1 από το σετ των μητρικών μασκών, χρησιμοποιείται δε συχνά για την κατασκευή τους μία διαδικασία ανάστροφης εμφάνισης ώστε να επιτευχθεί μία θετική και όχι αρνητική εικόνα της μάσκας.

4. Η Φωτολιθογραφία

Φωτολιθογραφία στη μικροηλεκτρονική ονομάζεται η φωτογραφική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του σχεδίου μιας μάσκας πάνω σε ένα υπόστρωμα.

Τα βήματα μίας τυπικής διαδικασίας φωτολιθογραφίας είναι:

- α) Η προετοιμασία του υποστρώματος.
- β) Η επικάλυψη με φωτοαντιστατικό.
- γ) Η προ- ή ελαφρά ξήρανση.
- δ) Η ευθυγράμμιση της μάσκας.
- ε) Η έκθεση.

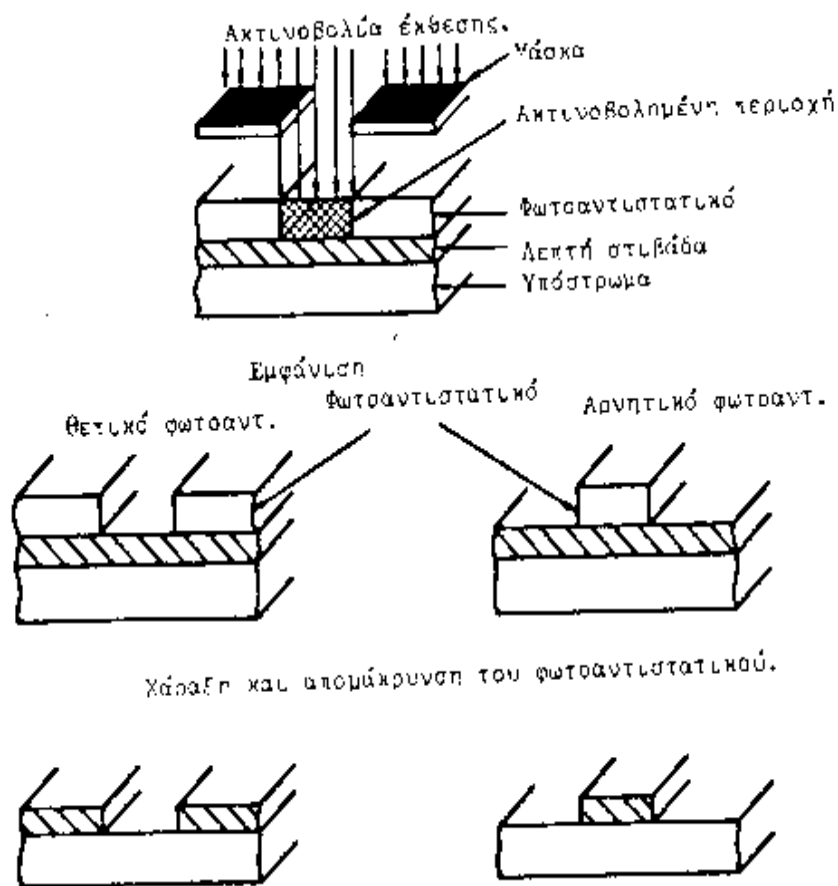
- στ) Η εμφάνιση.
- ζ) Η μετά- ή ισχυρή ξήρανση.
- η) Η χάραξη.
- θ) Η απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού.

A) Η προετοιμασία του υποστρώματος.

Για να “κολλήσει” καλά το φωτοαντιστατικό πάνω σε μια επιφάνεια πρέπει η επιφάνεια αυτή να είναι ελεύθερη από οργανικές μολύνσεις και υγρασία. Πολλά φωτοαντιστατικά είναι υδρόφοβα, ενώ μία από τις πιο συνηθισμένες επιφάνειες, το οξειδωμένο πυρίτιο, είναι υδρόφιλο. Έτσι, απαιτείται ειδική προετοιμασία της επιφάνειας για να είναι επιτυχής η φωτοχάραξη. Η προετοιμασία αυτή συνίσταται σε καθαρισμό της επιφάνειας με πεπιεσμένο ρεύμα απιονισμένου νερού, φύσημα με ρεύμα αζώτου και ξήρανση σε φούρνο υπερώθρου. Η καλή συνάφεια του φωτοαντιστατικού μπορεί επίσης να υποστηριχτεί από ένα διαλυτικό κατάλληλο να απομακρύνει από την επιφάνεια τα υπολείμματα της σκόνης και το οποίο απλώνεται με περιστροφή του υποστρώματος αμέσως πριν από την επίστρωση του φωτοαντιστατικού.

B) Η επικάλυψη με φωτοαντιστατικό.

Τα φωτοαντιστατικά είναι φωτοευαίσθητα υλικά που εμφανίζουν χημική αντοχή, έχουν την ιδιότητα να σχηματίζουν στιβάδες και επικολλώνται αρκετά καλά σε διάφορες επιφάνειες. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι φωτοαντιστατικών: τα αρνητικά και τα θετικά. Τα αρνητικά φωτοαντιστατικά πολυμερίζονται όταν εκτεθούν σε φως και έτσι το φωτοαντιστατικό που έχει εκτεθεί δεν απομακρύνεται κατά τη διαδικασία εμφάνισης. Τα θετικά φωτοαντιστατικά διασπώνται όταν φωτιστούν και μπορούν εύκολα να απομακρυνθούν κατά την εμφάνιση. Επομένως, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η ίδια μάσκα για να αποτυπωθούν δυο σχήματα, από τα οποία στο ένα παραμένει το φωτοαντιστατικό στα σημεία όπου η μάσκα είναι διαφανής και στο άλλο παραμένει στα σημεία όπου η μάσκα είναι αδιαφανής (σχήμα 5.4). Έχει κατασκευαστεί ένας αριθμός τύπων φωτοαντιστατικών με διαφορετική φασματική ευαισθησία. Τα πιο συνηθισμένα είναι ευαίσθητα στο υπεριώδες (UV), αλλά υπάρχουν και άλλα ευαίσθητα σε δέσμες ηλεκτρονίων ή μαλακές ακτίνες X για την αποτύπωση γραμμών με εύρος μικρότερο από 1,5μm.



Σχήμα 5. 4: Χαρακτηριστικά αρνητικού και θετικού φωτοαντιστατικού.

Η επίστρωση του φωτοαντιστατικού γίνεται συνήθως με περιστροφή του υποστρώματος. Η δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος φωτοαντιστατικού είναι μία πολύπλοκη διαδικασία. Το πάχος του τελικού στρώματος εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και το ιξώδες του φωτοαντιστατικού.

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο γίνεται η απόθεση του φωτοαντιστατικού πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Μόλυνση του υποστρώματος από σωματίδια πριν από την εφαρμογή του φωτοαντιστατικού έχει σαν αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη επίστρωσή του, ενώ τα σωματίδια σκόνης που πέφτουν κατά τη διάρκεια ή και μετά την επίστρωση, είναι η κυριότερη αιτία για τη δημιουργία τρυπών πάνω στο φωτοαντιστατικό. Εξ άλλου και ο έλεγχος της υγρασίας είναι μερικές φορές αναγκαίος.

Γ) Η προ- ή ελαφρά ξήρανση.

Σκοπός της ξήρανσης αυτής είναι η απομάκρυνση του διαλυτικού από το φωτοαντιστατικό και γίνεται είτε σε ένα φούρνο σε ατμόσφαιρα αέρα ή αζώτου ή σε μία διάταξη υπέρυθρου ακτινοβολίας. Ο χρόνος και η θερμοκρασία της ξήρανσης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να απομακρύνουν το διαλυτικό χωρίς να συσκολλούν τα μόρια του φωτοαντιστατικού.

Δ-Ε) Η ευθυγράμμιση της μάσκας και η έκθεση.

Η ευθυγράμμιση των μασκών προς τα σχήματα που έχουν ήδη αποτυπωθεί στο υπόστρωμα και η έκθεση του φωτοαντιστατικού μέσα από τη μάσκα απαιτεί έναν εξοπλισμό από τους πιο πολύπλοκους που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία μικροκυκλωμάτων.

Έχουν αναπτυχθεί συστήματα ευθυγράμμισης και έκθεσης στο UV με επαφή, γειννίαση και προβολή, ενώ απαιτούνται ειδικές τεχνικές ευθυγράμμισης για συστήματα έκθεσης με δέσμη ηλεκτρονίων ή ακτίνες X που συνδέονται με υπομικρονικά πλάτη γραμμών. Οι περισσότερες συσκευές ευθυγράμμισης масκών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία των ημιαγωγών είναι χειροκίνητες. Τα υποστρώματα συγκρατούνται με κενό πάνω σε μία τράπεζα ακριβείας με δυνατότητα μετακίνησης κατά X-Y και μικρομετρική περιστροφή.

Στα συστήματα εκτύπωσης με επαφή το υπόστρωμα χωρίζεται από τη μάσκα με μία απόσταση 25 ως 125μm κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ευθυγράμμισης. Όταν η μάσκα ευθυγραμμιστεί προς τα σχήματα του υποστρώματος, το υπόστρωμα έρχεται σε επαφή με τη μάσκα, το μικροσκόπιο ευθυγράμμισης απομακρύνεται, αντικαθίσταται από μία πηγή υπεριώδους, η οποία φωτίζει για έναν προκαθορισμένο χρόνο το υπόστρωμα μέσα από τη μάσκα. Μετά την έκθεση, το υπόστρωμα αποχωρίζεται από τη μάσκα και είναι έτοιμο για τη διαδικασία εμφάνισης.

Η εκτύπωση με γειννίαση έχει αναπτυχθεί σαν τεχνική για την αύξηση του χρόνου ζωής της μάσκας. Η βέλτιστη απόσταση μεταξύ μάσκας και υποστρώματος είναι 10 ως 30μm, ανάλογα με το ελάχιστο μήκος γραμμής που πρέπει να αναπαραχθεί. Ο βασικός εξοπλισμός είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση με επαφή, αλλά τα φαινόμενα περιθλασης είναι περιοριστικά της μεθόδου αυτής για τα μικρά πλάτη γραμμών.

Στα συστήματα εκτύπωσης με προβολή, τοποθετείται ένας φακός ανάμεσα στη μάσκα και το υπόστρωμα. Με τον τρόπο αυτό ο χρόνος ζωής της μάσκας γίνεται θεωρητικά άπειρος, υπάρχουν όμως σημαντικοί περιορισμοί για τον φακό προβολής, ιδίως όταν πρέπει να εκτεθούν υποστρώματα μεγάλης διαμέτρου, αλλά και τα φαινόμενα περιθλασης είναι σημαντικά για πλάτη γραμμών που πλησιάζουν το 1μm.

Μερικοί κατασκευαστές μηχανημάτων διαθέτουν αυτόματους ευθυγραμμιστές масκών, οι οποίοι δεν έχουν όμως ακόμη την απαιτούμενη επιτυχία.

Η ευθυγράμμιση των масκών για την έκθεση σε ακτίνες X γραμμών με υπομικρονικά πλάτη είναι πολύ δύσκολη με οπτικά μέσα. Πιθανώς είναι απαραίτητη η χρήση ενός αυτόματου συστήματος που να αποκρίνεται στις σκληρές ακτίνες X από ειδικούς στόχους ευθυγράμμισης ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια θέσης των 0,1μm για O.K. μεγάλης πυκνότητας.

Η λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απ' ευθείας αποτύπωση σχημάτων πάνω στο υπόστρωμα με τον ίδιο τρόπο όπως και για την κατασκευή масκών.

Μία τελείως διαφορετική προσέγγιση της λιθογραφίας είναι η προβολή ηλεκτρονικής εικόνας. Η μάσκα είναι κατασκευασμένη από χρώμιο πάνω σε γυαλί χαλαζία, το οποίο είναι επικαλυμμένο από μία φωτοκάθοδο ιωδιούχου καισίου. Η μάσκα φωτίζεται από πίσω με υπεριώδη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρονίων από τις περιοχές της φωτοκάθόδου που δεν καλύπτουν τα σχέδια χρωμίου. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται με μία διαφορά δυναμικού, τυπικά 20keV, μεταξύ της φωτοκάθόδου και του υποστρώματος που πρόκειται να εκτεθεί. Η ευθυγράμμιση γίνεται με αυτόματο σύστημα και με τη χρήση ειδικών στόχων από οξειδίο του τανταλίου. Αυτή η μέθοδος ηλεκτρονικής έκθεσης είναι πολύ ταχύτερη από τη λιθογραφία με δέσμη ηλεκτρονίων.

ΣΤ) Η Εμφάνιση.

Η εμφάνιση του φωτοαντιστατικού συνήθως πραγματοποιείται με ψεκασμό με ένα κατάλληλο διάλυμα που προτείνει ο κατασκευαστής του φωτοαντιστατικού. Ακολουθεί πλύση με δεύτερο διαλυτικό και φύσημα με ρεύμα αζώτου.

Πολλοί στο στάδιο αυτό παρατηρούν την πλακέτα στο μικροσκόπιο για να βεβαιωθούν ότι η εμφάνιση είναι καλή. Αν η εμφάνιση δεν είναι πλήρης μπορεί να επαναληφθεί ακόμη μία φορά ή να απομακρυνθεί τελείως το φωτοαντιστατικό και να επαναληφθεί όλη η διαδικασία της φωτολιθογραφίας.

Z) Μετά- ή ισχυρή ξήρανση.

Μετά την εμφάνιση το φωτοαντιστατικό έχει σύσταση τρίπτυη. Αν θερμανθεί σε θερμοκρασία μεταξύ 120 και 180°C για χρόνους από 20 ως 30 λεπτά, το φωτοαντιστατικό θα σκληρύνει και η συνάφειά του με το υπόστρωμα θα βελτιωθεί σημαντικά. Ο κύκλος χρόνου-θερμοκρασίας της διαδικασίας αυτής εξαρτάται από τον τύπο του φωτοαντιστατικού και το υλικό της επιφάνειας του υποστρώματος. Υπερβολική θερμοκρασία ξήρανσης μπορεί να κάνει δυσχερή την απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού στο αντίστοιχο στάδιο. Οι φούρνοι είναι οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται για την προ-ξήρανση.

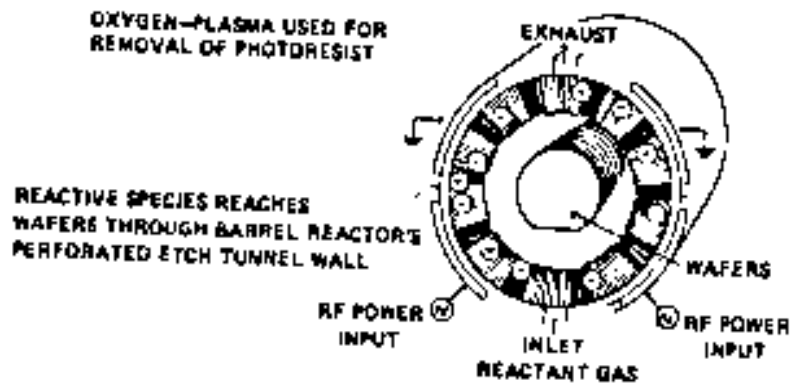
H) Η Χάραξη (etching).

Η διαδικασία χάραξης εξαρτάται από το υλικό που θέλουμε να χαράξουμε. Η υγρή-χημική χάραξη είναι η κύρια τεχνική που χρησιμοποιείται στις μικροηλεκτρονικές κατασκευές αλλά και διάφορες ξηρές διαδικασίες, όπως η χάραξη με sputtering, με πλάσμα ή με δέσμη ιόντων έγιναν δημοφιλείς σε πολλές εφαρμογές.

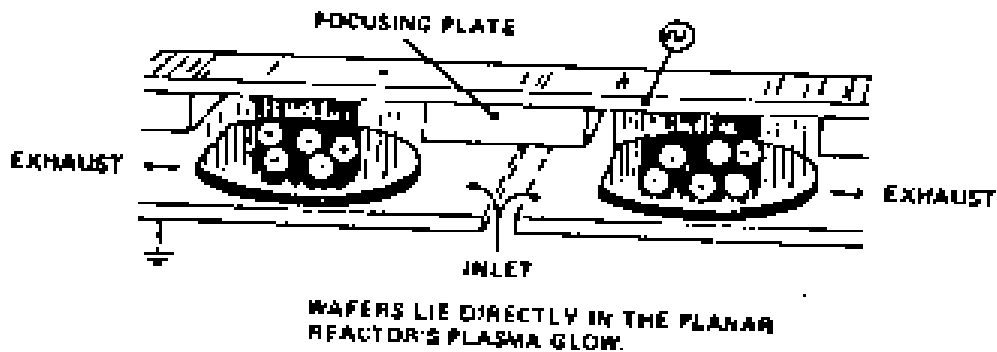
Η υγρή χημική χάραξη μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλή βύθιση ή ψεκασμό με κατάλληλα διαλύματα οξέων. Η ταχύτητα χάραξης εξαρτάται συνήθως από τη θερμοκρασία και απαιτείται προσεκτικός έλεγχος για βέλτιστο αποτέλεσμα.

Οι συσκευές για τη χάραξη με πλάσμα διατίθενται σε δύο μορφές: τους βαρελοειδείς αντιδραστήρες και τους επίπεδους αντιδραστήρες. Σ' ένα βαρελοειδή αντιδραστήρα τα υποστρώματα αναρτώνται κατακόρυφα σε έναν φορέα από τηγμένο χαλαζία. Το πλάσμα δημιουργείται με πέρασμα δραστικών αερίων μέσα από πεδίο RF (13,56 MHz), που προκαλείται από ένα πηνίο έξω από το θάλαμο του αντιδραστήρα. Σε πολλές περιπτώσεις ένας διάτρητος κύλινδρος αλουμινίου περιβάλλει τα υποστρώματα και περιορίζει το πλάσμα μεταξύ του τοιχώματος του αντιδραστήρα και του κυλίνδρου. Τα αντιδρώντα υλικά περνούν μέσα από τις τρύπες του κυλίνδρου και χαράσσουν τα υποστρώματα (σχήμα 5.5).

Σ' έναν επίπεδικό αντιδραστήρα πλάσματος, το πλάσμα δημιουργείται μεταξύ δύο παραλλήλων ηλεκτροδίων, που απέχουν περίπου 4cm μεταξύ τους μέσα στο θάλαμο του αντιδραστήρα. Τα ηλεκτρόδια διεγείρονται από γεννήτρια 400kHz και τα υποστρώματα είναι βυθισμένα μέσα στο πλάσμα (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5. 5: Διάγραμμα βαρελοειδούς αντιδραστήρα χάραξης με πλάσμα.



Σχήμα 5. 6: Επιπεδικός αντιδραστήρας πλάσματος.

Η χάραξη με sputtering είναι μία μορφή sputtering στην οποία το υπόστρωμα αποτελεί το στόχο. Η ταχύτητα χάραξης εξαρτάται από το υλικό που πρέπει να απομακρυνθεί. Σε πολλές περιπτώσεις το φωτοαντιστατικό απομακρύνεται με παρόμοια ταχύτητα όπως και το υλικό που πρέπει να χαραχθεί. Σ' αυτές τις περιπτώσεις γίνεται απόθεση μετάλλου για να προστατευθεί το υπόστρωμα στα σημεία, όπου η χάραξη δεν είναι επιθυμητή.

Η χάραξη με δέσμη ιόντων είναι μία μορφή sputtering που χρησιμοποιεί μία παραλληλισμένη δέσμη ιόντων με ενέργειες μεταξύ 500eV και 1keV. Η επιλεκτικότητα της χάραξης με δέσμη ιόντων είναι φτωχή, όπως και του sputtering. Π.χ. οι ρυθμοί χάραξης του SiO₂ και του Si είναι σχεδόν ίσοι. Ωστόσο έχουν παραχθεί υπομικρονικά σχήματα με ουσιαδώς κάθετα πλευρικά τοιχώματα με τη μέθοδο χάραξης με δέσμη ιόντων.

Θ) Η απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού.

Τα φωτοαντιστατικά μπορούν να απομακρυνθούν με διάφορες μεθόδους, όπως με διαλυτικά ή οξειδωτικά στην υγρά φάση ή με πλάσμα οξυγόνου.

Τα διαλυτικά χρησιμοποιούνται συνήθως σε θερμοκρασίες μεταξύ 90 και 150°C. Η δράση απομάκρυνσης είναι αποτέλεσμα απορρόφησης του διαλυτικού που προκαλεί εξόγκωση του φωτοαντιστατικού και κατάρρευση της συνάφειας προς το υπόστρωμα. Ακολουθεί διαδικασία πλύσης του διαλυτικού. Τα διαλυτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν για όλους τους τύπους φωτοαντιστατικών και είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού από το αλουμίνιο το οποίο θα οξειδωνόταν από το οξειδωτικό. Θετικά φωτοαντιστατικά που έχουν ξηρανθεί σε θερμοκρασία κάτω από 120°C μπορούν να απομακρυνθούν με ακετόνη. Το γεγονός αυτό το

χρησιμοποιούμε για τον καθορισμό των σχημάτων στο μέταλλο με μία τεχνική που ονομάζεται lift off. Κατ' αυτήν, πριν από την επιμετάλλωση το υπόστρωμα καλύπτεται από θετικό φωτοαντιστατικό, που έχει εμφανιστεί έτσι ώστε οι περιοχές που θέλουμε να καλύψουμε από μέταλλο να μή καλύπτονται από το φωτοαντιστατικό. Αφού αποθεθεί το μέταλλο, το φωτοαντιστατικό απομακρύνεται με ακετόνη και μαζί του το ανεπιθύμητο μέταλλο, ενώ το μέταλλο στις επιθυμητές περιοχές παραμένει.

Τα οξειδωτικά υγρής φάσης είναι οξέα, χρησιμοποιούνται για την οξείδωση των αρνητικών φωτοαντιστατικών και δίνουν CO₂ και νερό. Στη συνέχεια τα υποστρώματα πλένονται με τρεχούμενο απιονισμένο νερό.

Μία αποτελεσματική τεχνική για την απομάκρυνση του φωτοαντιστατικού είναι η χρήση πλάσματος οξυγόνου. Για τη λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται ένας βαρελοειδής αντιδραστήρας στα 10torr. Μία τυπική διαδικασία διαρκεί 30 λεπτά και το τέλος της υποδεικνύεται από την αλλαγή του χρώματος του πλάσματος. Επειδή υπάρχει υπόνοια ότι η μέθοδος του πλάσματος δημιουργεί μόλυνση του οξειδωτικού της πύλης των διατάξεων MOS από κινητά ιόντα, πρέπει να χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι απομάκρυνσης του φωτοαντιστατικού σ' αυτές τις διατάξεις.

Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, , Αραπογιάννη Αγγελική, 2014.
Αραπογιάννη Αγγελική. «Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων. Ενότητα Α. Κεφάλαιο 5: Μικρολιθογραφία». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://opencourses.uoa.gr/courses/DI31/>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] 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».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

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

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

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.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

- Σχήματα 5.2, 5.6: Original from: R. Colclaser. *Microelectronics Processing and Device Design*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1980.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» 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.

