

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

Δρ. Δ. Λαμπάκης
(13^η σειρά διαφανειών)

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Η επίπεδη τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων περιλαμβάνει τις ακόλουθες ανεξάρτητες διεργασίες:

- ανάπτυξη του κρυστάλλου του υποβάθρου,
- ανάπτυξη με επίταξη,
- οξειδωση,
- φωτολιθογραφία και χημική χάραξη,
- διάχυση προσμίξεων,
- εμφύτευση ιόντων,
- επιμετάλλωση.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Η κατασκευή των ολοκληρωμένων chip βασίζεται στην τεχνική της **φωτολιθογραφίας**.

Με την τεχνική της φωτολιθογραφίας μια δέσμη υπεριώδους φωτός (UV) διαπερνά κατάλληλη μάσκα και προσπίπτει σε λεπτή φέτα πυριτίου καλυμμένη με οξείδιο και πάνω από το οξείδιο με φωτοευαίσθητο υμένιο (φιλμ).

Η μάσκα σκιαγραφεί τα διάφορα μέρη του chip και το υπεριώδες φως θα προσπέσει μόνο στις περιοχές εκείνες που τις αφήνει εκτεθειμένες η μάσκα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το φωτοευαίσθητο υλικό είναι ένα γαλάκτωμα που πολυμερίζεται όταν εκτεθεί στο υπεριώδες φως.

Κατά τη διαδικασία εμφάνισης του φιλμ οι περιοχές του υμενίου στις οποίες δεν έπεσε το φως απομακρύνονται καθώς διαλύονται σε κατάλληλο χημικό όπως το τριχλωροαιθυλένιο (σε αντίθεση με αυτές που πολυμερίστηκαν οι οποίες παραμένουν).

Έτσι το chip περιλαμβάνει προστατευμένες και μη προστατευμένες περιοχές από υμένιο περιοχές.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Οι μη προστατευμένες από το υμένιο περιοχές υποβάλλονται σε χημική χάραξη (εμβάπτιση σε διάλυμα HCl) για απομάκρυνση του οξειδίου του πυριτίου από αυτές και στη συνέχεια υπόκεινται σε επεξεργασία που αλλάζει τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Κατόπιν οι πολυμερισμένες περιοχές του υμενίου απομακρύνονται και αυτές με χρήση χημικού διαλυτικού (H_2SO_4) σε συνδυασμό με μηχανική χάραξη.

Προστίθεται νέο στρώμα υλικού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα-στρώμα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Όταν η πολυστρωματική δομή ολοκληρωθεί, με αυτήν την επαναλαμβανόμενη διαδικασία, ακολουθεί η επιμετάλλωση.

Και για την επιμετάλλωση, στην πολυστρωματική δομή επιστρώνεται φωτοευαίσθητο υλικό το οποίο εκτίθεται σε υπεριώδη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε αυτό περνώντας δια μέσου μιας μάσκας.

Ρόλος της μάσκας σε αυτήν την περίπτωση, είναι ο καθορισμός όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ των διαφόρων μερών του chip.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το φιλμ εμφανίζεται και τα μη εκτεθειμένα στο φως (μη πολυμερισμένα) μέρη του απομακρύνονται.

Στη συνέχεια, το μέταλλο που δεν προστατεύεται από το υμένιο απομακρύνεται για να σχηματιστούν έτσι οι ηλεκτρικές συνδέσεις.

Στο τελικό στάδιο, το chip ελέγχεται και συσκευάζεται (test & package).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Σε διαδικασίες μαζικής παραγωγής, η χρήση της μάσκας σε κάθε βήμα που περιγράφηκε προηγουμένως γίνεται σε περισσότερα του ενός chip κάθε φορά.

Με μια βηματική διαδικασία (stepping process) σε ένα μεγάλο υπόβαθρο πυριτίου σχηματίζονται chips το ένα δίπλα στο άλλο.

Το υπόβαθρο του πυριτίου μετακινείται βηματικά κάτω από τη μάσκα και υπό την έκθεση της UV ακτινοβολίας.

Με τον τρόπο αυτό επαναλαμβάνονται οι ίδιες διαδικασίες φωτολιθογραφίας από chip σε chip χρησιμοποιώντας την ίδια μάσκα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το φωτοευαίσθητο υλικό για το οποίο έγινε αναφορά στην προηγούμενη περιγραφή της φωτολιθογραφίας χαρακτηρίζεται ως **αρνητικό (negative photoresist)**.

Στην τεχνική της φωτολιθογραφίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και **θετικό φωτοευαίσθητο υλικό**.

Στην περίπτωση αυτή το τμήμα του φωτοευαίσθητου υλικού που εκτίθεται στο φως αποσυντίθεται και απομακρύνεται με πλύση για να παραμείνουν τα τμήματα που βρίσκονταν κάτω από τις αδιαφανείς περιοχές της μάσκας.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Σε κάθε περίπτωση, το φωτοευαίσθητο υλικό που θα παραμείνει θα πρέπει **να κολλά πολύ καλά** στην επιφάνεια του στρώματος που πρόκειται να προστατέψει από τη χημική διάβρωση και να δίνει ξεκάθαρες και απότομες διαχωριστικές επιφάνειες ώστε να γίνει στη συνέχεια με μεγάλη χωρική ακρίβεια η απομάκρυνση του διοξειδίου του πυριτίου, του αλουμινίου ή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ανάλογα με την περίπτωση, από τις μη προστατευμένες περιοχές.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Ακολουθεί αναλυτικότερη παρουσίαση των βημάτων για την παραγωγή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

- 1.** Δημιουργούνται και ελέγχονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή κατασκευαστικά σχέδια σε μεγάλη κλίμακα για ευκολότερο χειρισμό των λεπτομερειών.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

2. Από τα σχέδια αυτά κατασκευάζονται με σμίκρυνση οι αντίστοιχες μάσκες. Το σχέδιο του κυκλώματος αποτελείται από διάφορα επίπεδα μάσκας.

Παρατήρηση: Για μεγαλύτερη ακρίβεια, αντί της φωτολιθογραφίας μπορεί πολλές φορές να χρησιμοποιηθεί η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης πάνω σε υλικά μάσκας ευαίσθητα σε ηλεκτρόνια. Μπορούν έτσι να αναδειχτούν μικρότερες λεπτομέρειες στη σχεδίαση αφού αυτές εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Το μήκος κύματος μιας δέσμης ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρότερο από αυτό της UV ακτινοβολίας.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

3. Παρασκευάζεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες μια ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας.

4. Η ράβδος πυριτίου χωρίζεται με διαμάντι σε λεπτές φέτες – wafers (δηλαδή στα ελληνικά μπισκότα λόγω της διατομής τους σε σχήμα κυκλικού δίσκου) οι οποίες στη συνέχεια λειαίνονται σε πολλαπλά στάδια για να αποκτήσουν μια πολύ λεία επιφάνεια που μοιάζει με καθρέπτη.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

5. Το κάθε μπισκότο καλύπτεται με μονωτικό στρώμα οξειδίου του πυριτίου.

6. Επάνω στο μονωτικό στρώμα οξειδίου αναπτύσσεται προστατευτικό υμένιο που όπως και το φιλμ σε μια συνηθισμένη κάμερα είναι ευαίσθητο στο φως. Το φωτοευαίσθητο υλικό τοποθετείται σε μορφή μικρής σταγόνας διαλύματος στο κέντρο ενός wafer το οποίο στη συνέχεια περιστρέφεται με αρκετές χιλιάδες στροφές το λεπτό και έτσι λόγω του ιξώδους του το διάλυμα εξαπλώνεται φυγοκεντρικά (spin coating) πάνω στο wafer όπου και θερμαίνεται με ζεστό αέρα ή υπέρυθρη ακτινοβολία για να απομακρυνθεί ο διαλύτης (soft bake).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

7. Ακολουθεί η έκθεση του μπισκότου σε υπεριώδες φως το οποίο διαμέσου της κατάλληλης μάσκας προσπίπτει στο φωτοευαίσθητο φιλμ. Στις περιοχές του φιλμ όπου η μάσκα αφήνει το φως να πέσει το προστατευτικό υλικό πολυμερίζεται (φωτοπολυμερισμός).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

8. Σε μια διαδικασία εμφάνισης που περιλαμβάνει χημική διάλυση με τριχλωροαιθυλένιο τα τμήματα του προστατευτικού υλικού που δεν εκτέθηκαν στο φως και δεν πολυμερίστηκαν απομακρύνονται. Το προστατευτικό υλικό που πολυμερίστηκε στη συνέχεια στερεώνεται θερμικά (hard bake) ώστε να μείνει ανεπηρέαστο στο βήμα διάβρωσης και μηχανικής χάραξης που θα ακολουθήσει.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

9. Ακολουθεί μια διαδικασία χημικής χάραξης etching. Σε αυτήν τη διαδικασία απομακρύνεται το μη προστατευμένο μονωτικό υλικό δημιουργώντας έτσι ένα σχέδιο (pattern) από μη προστατευμένες περιοχές πυριτίου οι οποίες περιστοιχίζονται από άλλες περιοχές με πυρίτιο που προστατεύεται από οξείδιο του πυριτίου το οποίο με κατάλληλες μάσκες διατηρήθηκε και δε χαράχτηκε χημικά.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

10. Οι μη προστατευμένες – εκτεθειμένες – περιοχές του πυριτίου υποβάλλονται σε μια διαδικασία αλλαγής των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται doping (εμπλουτισμός) και περιλαμβάνει διαχύσεις ή εμφυτεύσεις προσμίξεων και θερμική επεξεργασία.

→ **Σημείωση:** Τα βήματα 5-10 επαναλαμβάνονται προκειμένου να αναπτυχθεί στρώμα-στρώμα μια πολυστρωματική δομή η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τόσο μονωτικά όσο και αγώγιμα στρώματα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

11. Αφού κατασκευαστούν όλα τα επιμέρους τμήματα πάνω στο chip ακολουθεί η διαδικασία της επιμετάλλωσης για την ηλεκτρική διασύνδεση των επιμέρους τμημάτων. Πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί η εναπόθεση μετάλλου πάνω στο chip.

12. Στην επιφάνεια του μετάλλου τοποθετείται φωτοευαίσθητο (στο UV) υλικό.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

13. Υπεριώδες φως προσπίπτει δια μέσου κατάλληλης μάσκας πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό. Η μάσκα είναι έτσι φτιαγμένη ώστε να μπορεί να οριοθετήσει τις μεταλλικές συνδέσεις μεταξύ των διαφόρων μερών του chip.

14. Με κατάλληλα χημικά απομακρύνονται οι περιοχές από το φωτοευαίσθητο υλικό στις οποίες η μάσκα ήταν αδιαφανής μη επιτρέποντας να πέσει το φως σε αυτές.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

15. Με μια διαδικασία χημικής χάραξης απομακρύνεται το μέταλλο που δεν προστατεύεται από φωτοευαίσθητο υλικό. Μένει έτσι το μέταλλο των μεταλλικών συνδέσεων το οποίο παρουσιάζει μια τέτοια κατανομή πάνω στο chip όπως αυτή που καθόρισε η μάσκα.

16. Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα μέσα από επανάληψη της προαναφερθείσης διαδικασίας είναι δυνατό να κατασκευάζονται πολλαπλά επίπεδα επιμετάλλωσης χωρισμένα με μονωτικά στρώματα για αποφυγή ανεπιθύμητων βραχυκυκλωμάτων.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

17. Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας φάσης της επιμετάλλωσης τα ολοκληρωμένα που παράχθηκαν ελέγχονται για τις επιδόσεις τους.

18. Με τη βοήθεια διαμαντιού, τα chips διαχωρίζονται μεταξύ τους ώστε να αποτελέσουν αυτόνομα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Φωτολιθογραφία και αλληλουχία βημάτων κατά την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

19. Το κάθε chip συσκευάζεται σε μια προστατευτική θήκη και τοποθετούνται κατάλληλοι μεταλλικοί ακροδέκτες που θα παίξουν το ρόλο των εισόδων, των εξόδων και των συνδέσεων τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

20. Ακολουθεί νέος έλεγχος λειτουργίας και αξιοπιστίας και προώθηση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στους κατασκευαστές ηλεκτρονικών συσκευών.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Χημική χάραξη – διάβρωση (Etching)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πιο κοινά υλικά που υπόκεινται σε χημική χάραξη κατά τις επίπεδες διεργασίες της μικροηλεκτρονικής και τα αντίστοιχα διαλύματα (etching solutions) που απαιτούνται.

Υλικό	Διάλυμα
SiO ₂	HF
πολυκρυσταλλικό Si	HF
Si ₃ N ₄	Φωσφορικό οξύ εν βρασμό
Αλουμίνιο	Φωσφορικό οξύ

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Χημική χάραξη – διάβρωση (Etching)

Από τα υλικά του πίνακα, το SiO_2 και το Si_3N_4 χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά με το SiO_2 να χρησιμοποιείται παράλληλα και σαν μάσκα στις επίπεδες διεργασίες.

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο χρησιμοποιείται ως αγώγιμο υλικό πύλης σε κάποια MOS τρανζίστορ ενώ το αλουμίνιο είναι το κύριο υλικό για τις επιμεταλλώσεις και τη δημιουργία ακροδεκτών και ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Χημική χάραξη – διάβρωση (Etching)

Το Si_3N_4 έχει παρόμοιες ιδιότητες με το SiO_2 αλλά παρέχει μεγαλύτερη προστασία έναντι των ανεπιθύμητων προσμίξεων και γενικότερα έχει καλύτερες επιδόσεις ως **παθητικό στρώμα (passivation layer)**.

Το Si_3N_4 απομακρύνεται με τη χρήση βραστού φωσφορικού οξέως όμως το φωτοευαίσθητο υλικό δεν μπορεί να δράσει προστατευτικά έναντι αυτού του οξέως σε αντίθεση με το διοξείδιο του πυριτίου που μπορεί να δράσει προστατευτικά.

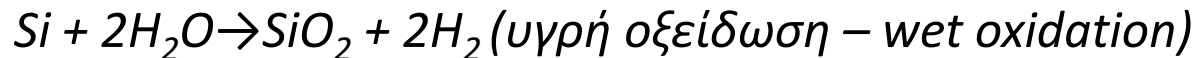
Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση του Si_3N_4 ρόλο μάσκας διαδραματίζει το SiO_2 και όχι το φωτοευαίσθητο υλικό. Έτσι το Si_3N_4 συνήθως συναντάται στη μικροηλεκτρονική σε ρόλο παθητικού στρώματος που περιβάλλεται (sandwich) από στρώματα SiO_2 .

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Οξείδωση του πυριτίου

Το προστατευτικό και μονωτικό στρώμα του SiO_2 αναπτύσσεται στην επιφάνεια του wafer πυριτίου με θερμική οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία (900-1200°C σε φούρνους χαλαζία με θερμαντικά σπειρώματα) με τους δύο ακόλουθους τρόπους:



Σημείωση: στην 1^η περίπτωση η ατμόσφαιρα της οξείδωσης είναι ξηρό οξυγόνο και στη δεύτερη είναι υδρατμοί.

Και στις δύο περιπτώσεις, τα οξειδωτικά υλικά έρχονται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια του wafer πυριτίου αντιδρούν με αυτήν και η διεπιφάνεια SiO_2 -Si σιγά-σιγά κινείται "προς τα κάτω" μέσα στο wafer.

Τελικά περίπου το 42-44% του πάχους του οξειδίου που προκύπτει βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του wafer πυριτίου

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Οξείδωση του πυριτίου

Η υγρή οξείδωση είναι πολλές φορές ταχύτερη από την ξηρή έχει όμως το μειονέκτημα ότι απελευθερώνει αέριο υδρογόνο το οποίο διαχέεται γρήγορα και ξεφεύγει από το οξείδιο προκαλώντας του μια σχετική αποδυνάμωση και καθιστώντας το πιο πορώδες.

Καθίσταται λοιπόν προφανές πως όταν το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη ενός πολύ λεπτού και με ακρίβεια ελεγχόμενου οξειδίου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του διηλεκτρικού πύλης σε MOSFET, η μεθοδολογία θερμικής οξείδωσης που προκρίνεται είναι αυτή της ξηρής οξείδωσης.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

Κατά τις επίπεδες διεργασίες της μικροηλεκτρονικής, το SiO_2 το Si_3N_4 και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο εναποτίθενται σε άλλο υλικό (συνήθως στο πυρίτιο) με την τεχνική της **χημικής εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition - CVD)**.

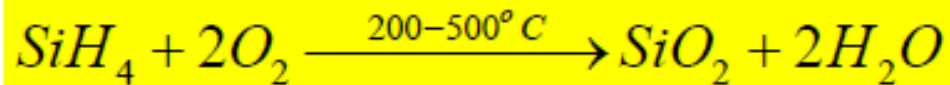
Η τεχνική CVD περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών με κεντρική φιλοσοφία την υλοποίηση μιας χημικής αντίδρασης σε υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα αέριο όπως το υδρογόνο ή το άζωτο σαν αέριο φορέα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής.

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

→ **Διοξείδιο του πυριτίου.** Η εναπόθεση του διοξειδίου του πυριτίου γίνεται με την αντίδραση μεταξύ σιλανίου (SiH_4) και οξυγόνου σε θερμοκρασίες 200-500°C χρησιμοποιώντας N_2 σαν αέριο φορέα:



Πρόκειται για μια πολύ χρήσιμη αντίδραση επειδή επιτρέπει την εναπόθεση διοξειδίου του πυριτίου ακόμη και πάνω από μια επιμετάλλωση αλουμινίου. Αυτό καθίσταται εφικτό λόγω του σχετικά χαμηλού εύρους θερμοκρασιών της αντίδρασης συγκριτικά με το σημείο τήξης του αλουμινίου (660°C).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

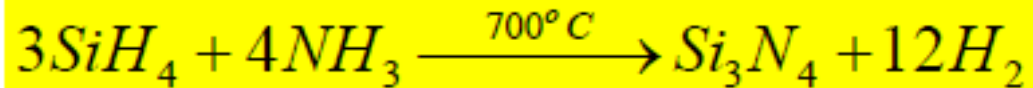
Σημείωση: Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης να διοχετεύονται στον αέριο φορέα και προσμίξεις έτσι ώστε να παραχθεί ένα ντοπαρισμένο οξείδιο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή για διάχυση προσμίξεων μέσα στο πυρίτιο.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

→ **Νιτρίδιο του πυριτίου** (Si_3N_4). Η εναπόθεση νιτριδίου του πυριτίου επιτυγχάνεται με αλληλεπίδραση σιλανίου και αμμωνίας γύρω στους 700°C με βάση την αντίδραση:



παρέχοντας ένα πολύ πυκνό διηλεκτρικό με εξαιρετικές ιδιότητες για δράση ως passivation layer.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

→ Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, επιταξιακή ανάπτυξη πυριτίου. Η εναπόθεση γίνεται με διάσπαση του σιλανίου σε ατμόσφαιρα υδρογόνου στους 1000°C περίπου:



Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο συνήθως εναποτίθεται πάνω σε λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου για την κατασκευή της πύλης (υποκαθιστώντας τη μεταλλική πύλη) σε MOS τρανζίστορ.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

Σημείωση 1: Η σημασία της προηγούμενης αντίδρασης είναι πολύ μεγαλύτερη αν ληφθεί υπόψη ότι η πραγματοποίησή της πάνω σε επιφάνεια πυριτίου (αντί επί της επιφάνειας του λεπτού διοξειδίου του πυριτίου στην περίπτωση της πύλης MOSFET) μπορεί με κατάλληλες συνθήκες να οδηγήσει στο σχηματισμό επιταξιακού στρώματος πυριτίου πάνω στο πυρίτιο. Το πυρίτιο δηλαδή εναποτίθεται ακολουθώντας την κρυσταλλική δομή του υποβάθρου πυριτίου που το υποδέχεται.

Σημείωση 2: Η επιταξιακή αυτή τεχνική εναπόθεσης πυριτίου σε πυρίτιο μπορεί να συνδυαστεί με παράλληλη διοχέτευση προσμίξεων δότη (As, P, Sb) ή αποδέκτη (B) για τη δημιουργία ομοιόμορφα ντοπαρισμένων στρωμάτων πυριτίου n- ή p-τύπου αντίστοιχα πάνω στο πυρίτιο. Διαδικασία που είναι πολύ διαδεδομένη στην ανάπτυξη διπολικών διατάξεων.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (CVD).

→ **Επιμετάλλωση** (π.χ. Εναπόθεση αλουμινίου). Η συγκεκριμένη επίπεδη διεργασία πραγματοποιείται με εξάχνωση του μετάλλου σε κενό (vacuum evaporation). Το υψηλό κενό παρέχει μια μεγάλη μέση ελεύθερη διαδρομή στους ατμούς του μετάλλου εξασφαλίζοντας κατάλληλες συνθήκες εναπόθεσης. Η εξάχνωση επιτυγχάνεται είτε με θερμαινόμενο νήμα είτε με βομβαρδισμό κάνοντας χρήση δέσμης ηλεκτρονίων.

→ Η πυκνότητα ρεύματος σε αυτήν τη διαδικασία **δεν** μπορεί να ξεπερνά τα μερικά mA/μm² επειδή οι μεγάλες πυκνότητες ρεύματος οδηγούν στο ανεπιθύμητο φαινόμενο του **electromigration** κατά το οποίο παρατηρούνται αλλού συσσωρεύσεις και αλλού αραιώσεις των εναποτιθέμενων ατόμων του μετάλλου, οδηγώντας έτσι σε τοπικές-εντοπισμένες συνθήκες ανοικτού κυκλώματος που οδηγούν σε λειτουργικές βλάβες.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τεχνικές εναπόθεσης (Sputtering).

Μια εναλλακτική μέθοδος εναπόθεσης, που όμως παρέχει μικρότερους ρυθμούς ανάπτυξης υλικού, είναι αυτή του sputtering.

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, θετικά ιόντα τα οποία παράγονται από εκκένωση αίγλης επιταχύνονται με τη βοήθεια υψηλής τάσης και κατευθύνονται σε μια κάθοδο-στόχο που έχει επιστρωθεί με το υπό εναπόθεση υλικό.

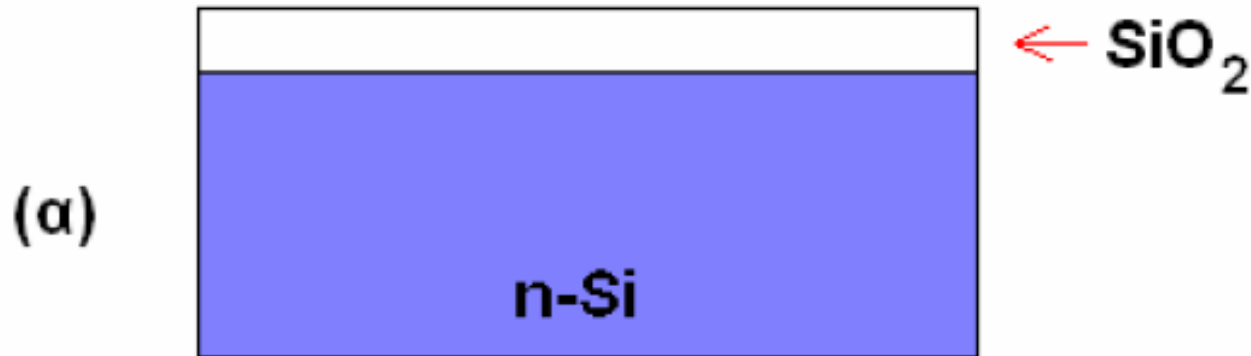
Ο βομβαρδισμός του υλικού επίστρωσης της καθόδου προκαλεί την απελευθέρωση "sputtering" του επιστρωμένου υλικού, μέρος του οποίου θα κατευθυνθεί προς το wafer και θα εναποτεθεί σε αυτό.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται 8 στάδια κατασκευής μιας δομής MOS με παχύ στρώμα οξειδίου και πύλη από αλουμίνιο.

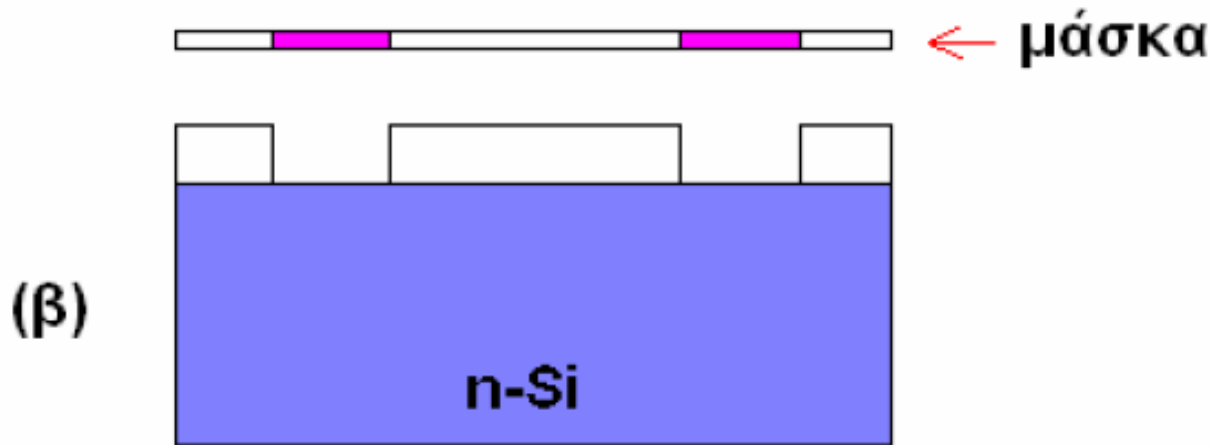


(α) η επιφάνεια του υποστρώματος καθαρίζεται και αναπτύσσονται μερικές χιλιάδες Angstrom (μερικά δέκατα του μm) διοξειδίου του πυριτίου πάνω σε αυτήν για να λειτουργήσουν σα μάσκα παρεμπόδισης της διάχυσης που θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο βήμα.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

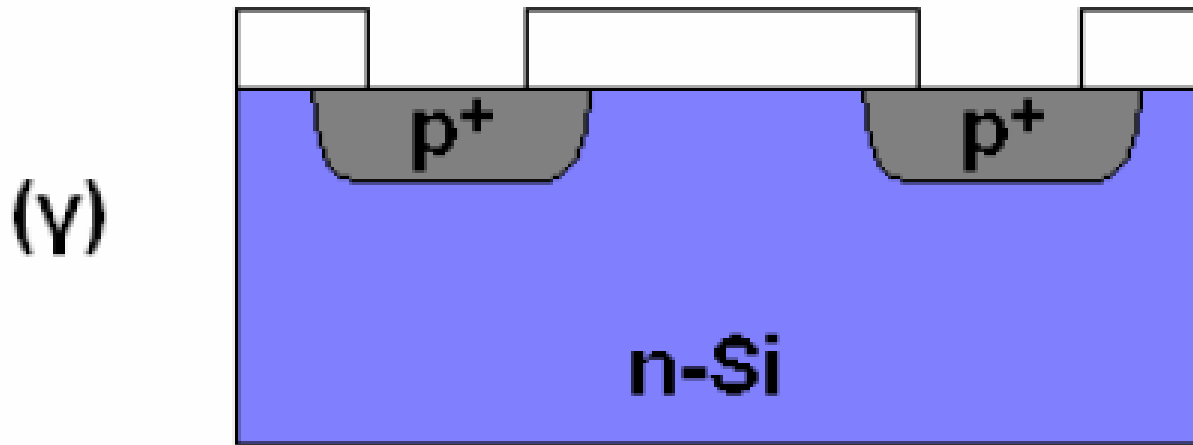


(β) χρησιμοποιείται η πρώτη μάσκα με φωτοευαίσθητο υλικό που οριοθετεί τις περιοχές στις οποίες θα απομακρυνθεί το οξείδιο. Το διοξείδιο του πυριτίου απομακρύνεται από περιοχές όπου πρόκειται να πραγματοποιηθούν διαχύσεις πηγής και απαγωγού (βλ. κεφ. Τρανζίστορ MOSFET) ή να δημιουργηθεί ένα στρώμα διάχυσης που θα έχει το ρόλο του μέσου διασύνδεσης.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

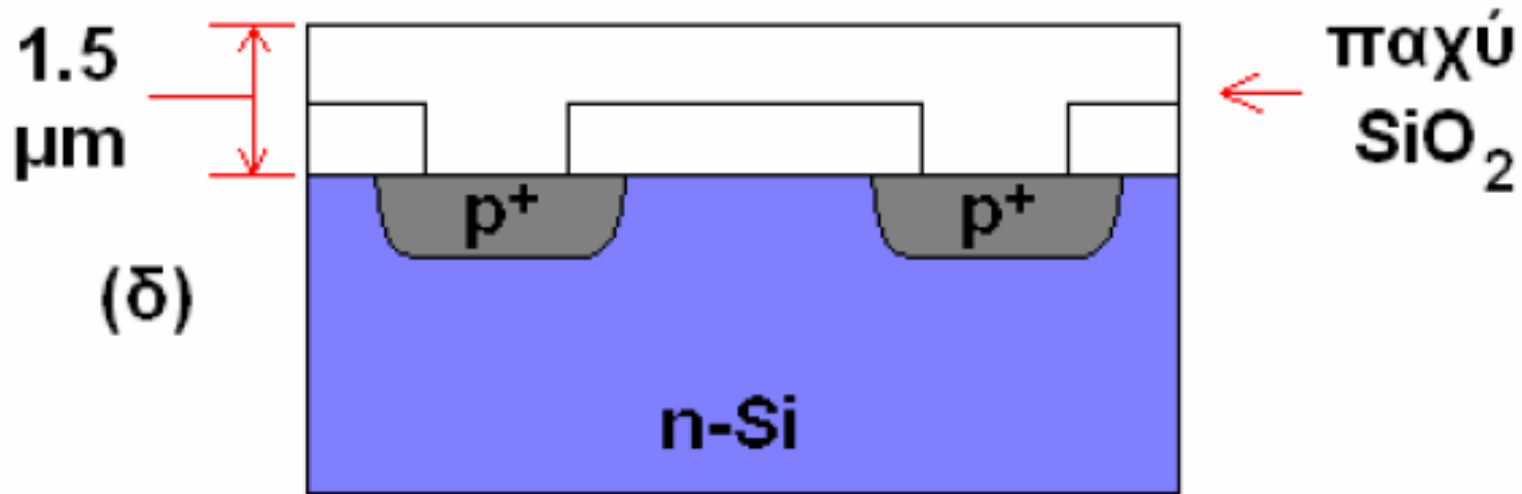


(γ) πραγματοποιούνται διαχύσεις για τη διαμόρφωση των p^+ περιοχών σε πηγή και απαγωγό. (Παρατήρηση: Η διαδικασία της προώθησης των προσμίξεων μέσα στο υπόστρωμα απαιτεί θέρμανση του δείγματος η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μικρής έκτασης θερμική οξείδωση των επιφανειών των ντοπαρισμένων περιοχών).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

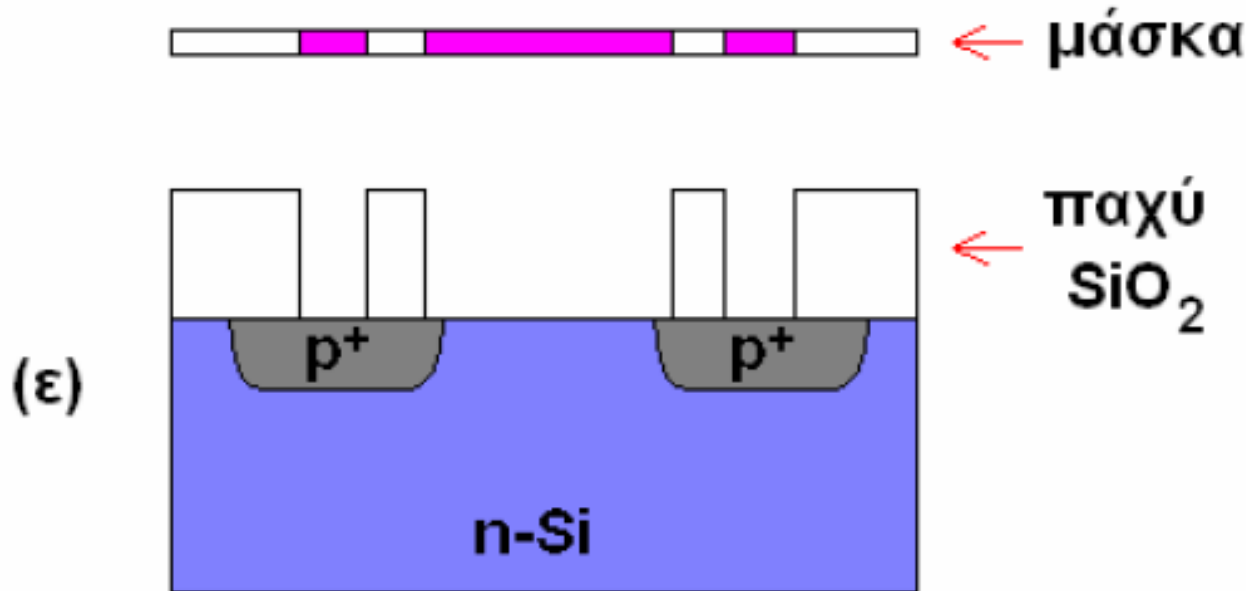


(δ) για την κατάλληλη ηλεκτρική απομόνωση, αναπτύσσεται ένα παχύ στρώμα οξειδίου πάχους 1.5 μm.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

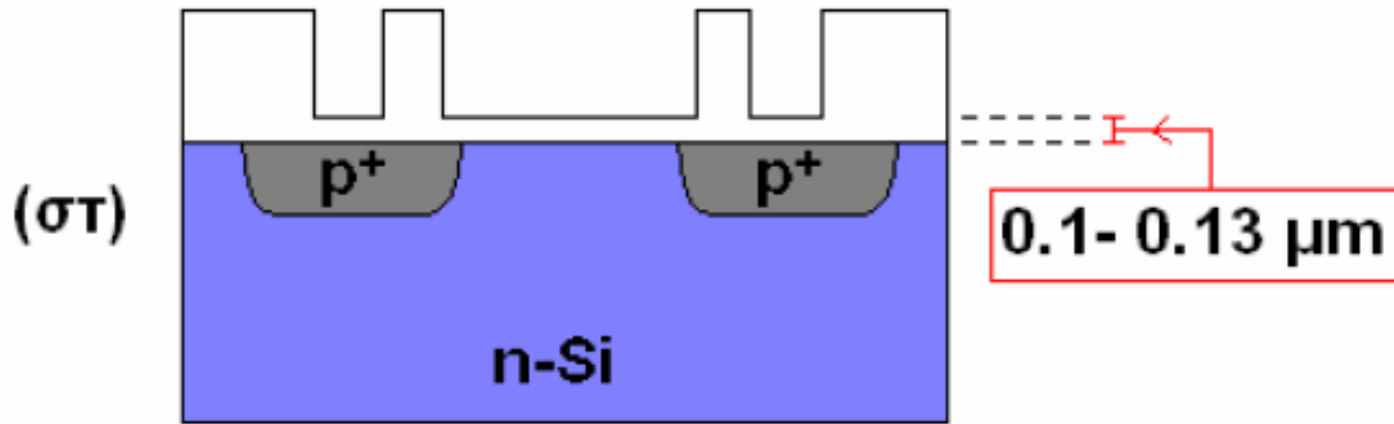


(ε) χρησιμοποιείται μια **δεύτερη μάσκα** για την επίτευξη διάβρωσης μέχρι την επιφάνεια του πυριτίου και στις θέσεις που θα αναπτυχθούν οι ακροδέκτες της συσκευής.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

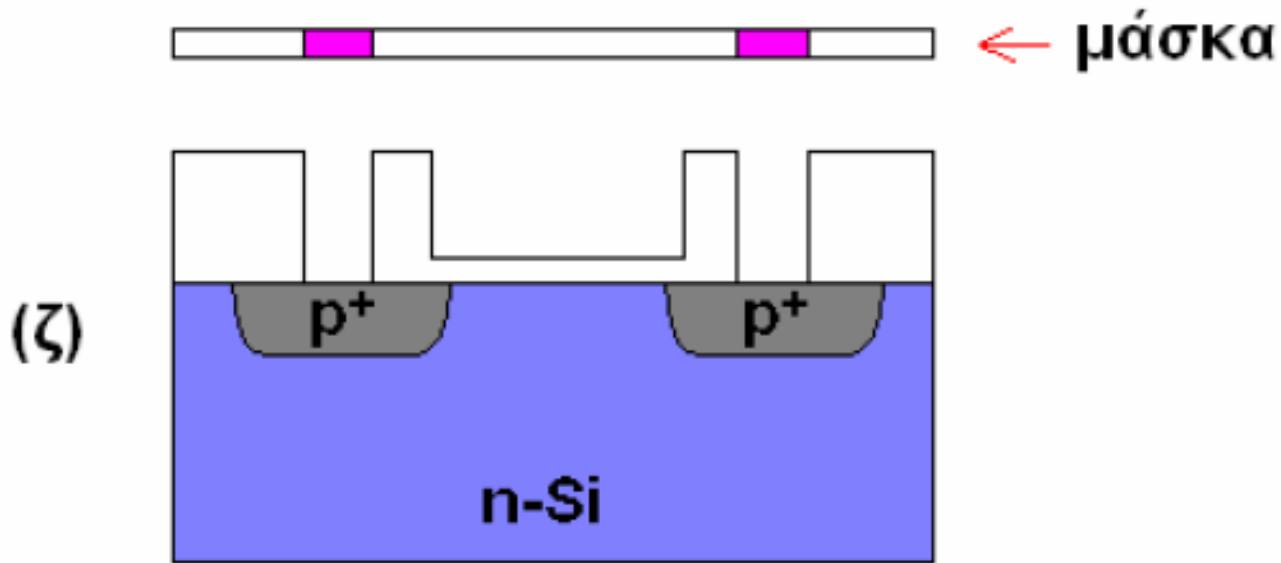


(στ) χωρίς τη χρήση μάσκας, αναπτύσσεται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου πάχους 0.1-0.13 μm στην επιφάνεια ολόκληρης της δομής αλλά η χρήση του περιορίζεται στο σχηματισμό του λεπτού διηλεκτρικού της πύλης του MOSFET (η παρουσία του λεπτού αυτού οξειδίου είναι **ανεπιθύμητη** στις περιοχές των διαχύσεων πηγής και απαγωγού).

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.

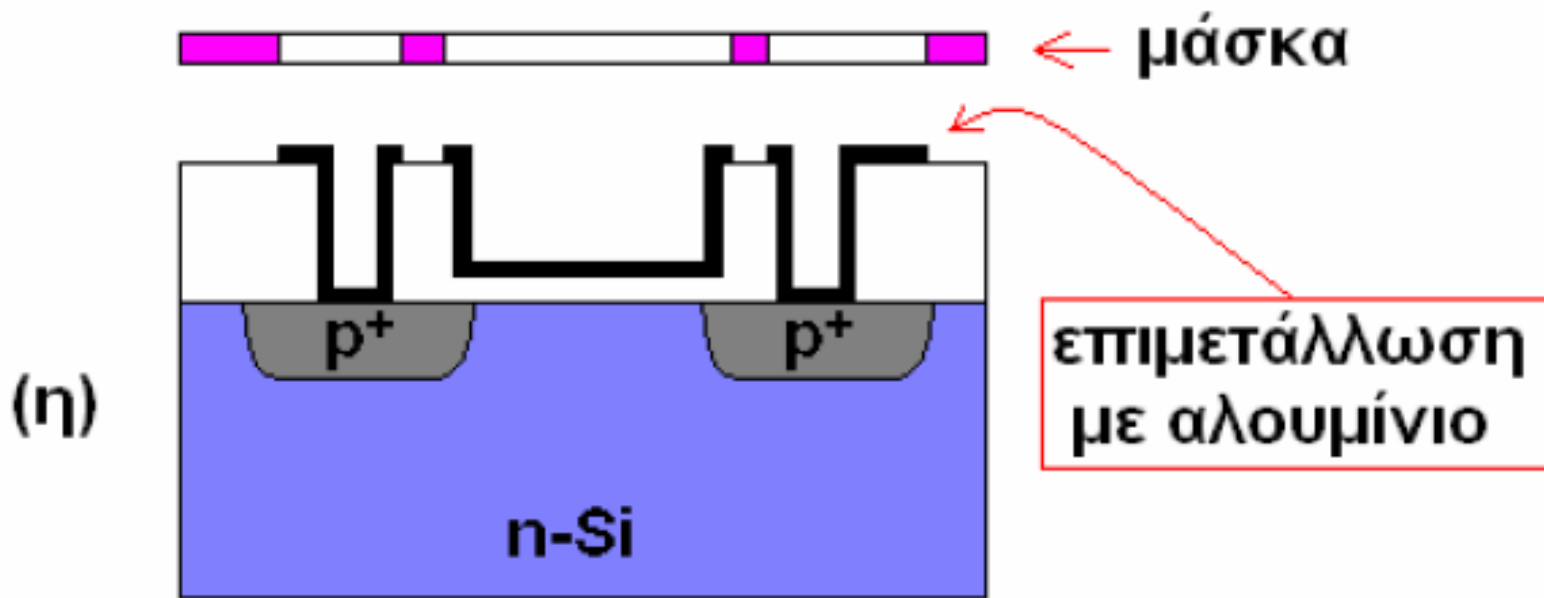


(ζ) μια τρίτη μάσκα θα αφαιρέσει το ανεπιθύμητο οξείδιο από τις διαχύσεις πηγής και απαγωγού γιατί εκεί πρόκειται να κατασκευαστούν οι μεταλλικοί ακροδέκτες.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Διεργασίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μελέτη περίπτωσης: Κατασκευή δομής MOS με πύλη αλουμινίου.



(η) δημιουργία ακροδεκτών:

(i) πραγματοποιείται επιμετάλλωση σε ολόκληρη την επιφάνεια της δομής,

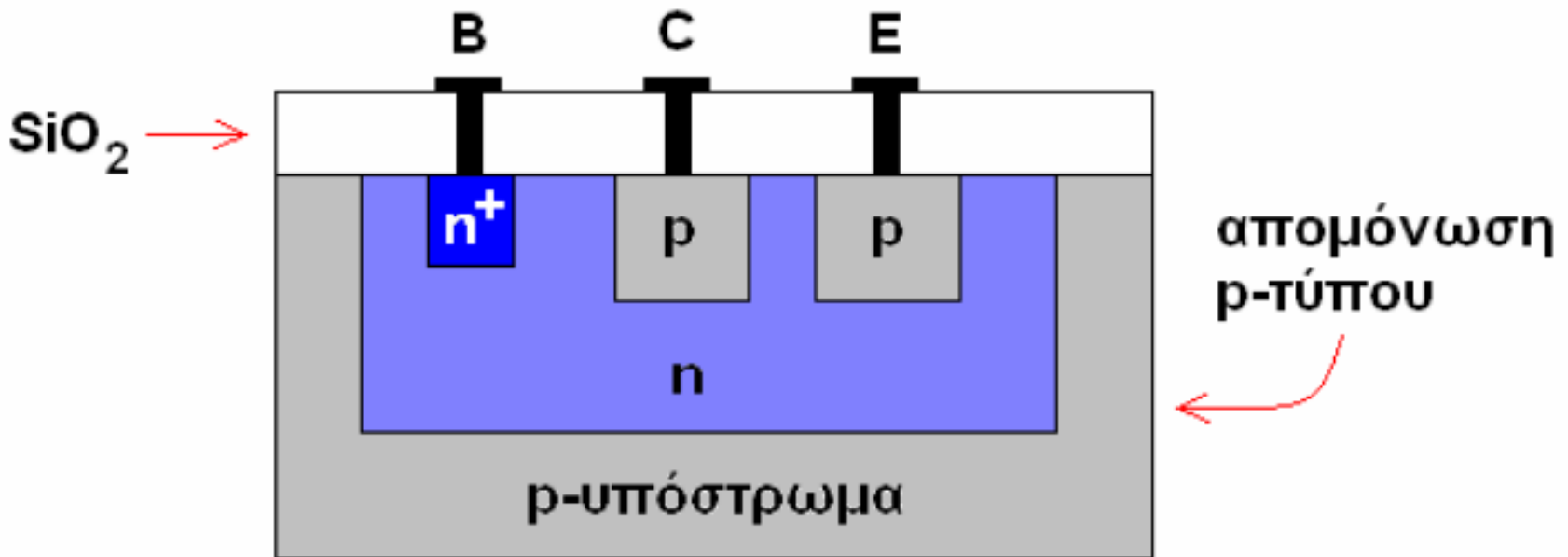
(ii) μια τέταρτη μάσκα καθορίζει τις περιοχές όπου το μέταλλο δεν είναι επιθυμητό και θα πρέπει να αφαιρεθεί.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Η τομή ενός οριζόντιου pnp διπολικού transistor επαφής.



Οι p-τύπου διαχύσεις σχηματίζουν τις περιοχές του συλλέκτη και του εκπομπού.

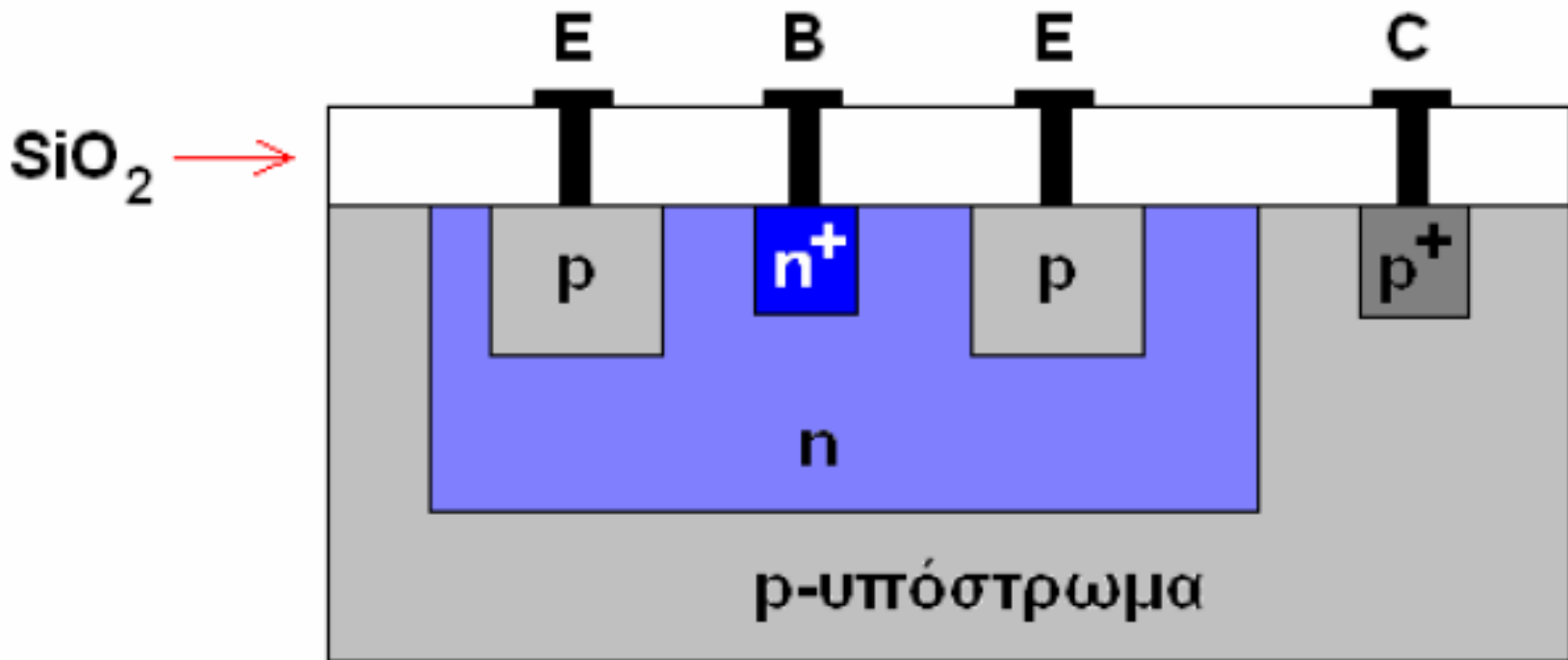
Σημείωση: Η δομή χαρακτηρίζεται ως **οριζόντια** επειδή τα 3 στοιχεία του τρανζίστορ (εκπομπός, βάση και συλλέκτης) βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Για το **κατακόρυφο** τρανζίστορ η διάταξη των 3 στοιχεία του τρανζίστορ είναι κατακόρυφη.



Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

→ Η n^+ -τύπου διάχυση στην περιοχή της βάσης χρειάζεται για να διαμορφωθεί μια αρκετά καλή ωμική επαφή της n -τύπου βάσης με τον μεταλλικό ακροδέκτη της βάσης.

→ Το αλουμίνιο από το οποίο αποτελείται ο μεταλλικός ακροδέκτης της βάσης δρα σαν p -τύπου πρόσμιξη στο πυρίτιο.

→ Όποτε ένας ακροδέκτης έρχεται σε επαφή με n -τύπου πυρίτιο δημιουργείται μια p_n επαφή.

→ Προς αποφυγή της δημιουργίας αυτής της παρασιτικής διόδου, κάθε φορά που ένας ακροδέκτης αλουμινίου πρόκειται να έρθει σε επαφή με n -τύπου πυρίτιο, παρεμβάλλεται ανάμεσα σε αυτόν και το n -τύπου πυρίτιο μια n^+ διάχυση με στόχο την επίτευξη ωμικής επαφής.

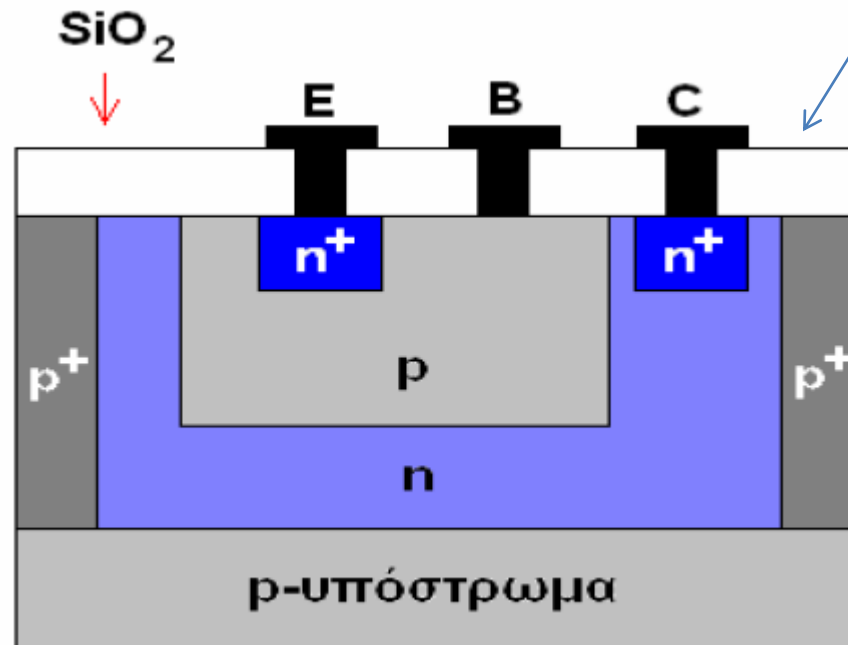
Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Παρόμοια με αυτή των pnp κατασκευάζεται και ένα npn BJT.

Σημείωση: το οριζόντιο τρανζίστορ pnp έχει αισθητά μικρότερη τιμή του β σε σύγκριση με το npn επειδή ο εκπομπός του είναι p-τύπου και δεν εγχέει προς τη βάση του τόσους φορείς μειονότητας (οπές) όσους μπορεί να εγχέει (ηλεκτρόνια) στη δική του (p-τύπου) βάση ο n^+ εκπομπός του npn BJT.



Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Αν συγκριθούν οι επιφάνειες βάσης του οριζόντιου pnp και του κατακόρυφου nnp τρανζίστορ, παρατηρείται μεγαλύτερη επιφάνεια στο οριζόντιο pnp τρανζίστορ, γεγονός που δικαιολογεί και τα μικρότερα ρεύματα συλλέκτη στα οποία το οριζόντιο pnp BJT λειτουργεί.

Αντίθετα, τα κατακόρυφα τρανζίστορ χρησιμοποιούν το υπόστρωμα ως συλλέκτη (γι αυτό και ονομάζονται και pnp BJT υποστρώματος) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο ρεύμα ή ισχύ.

Το p^+ ντοπάρισμα στα όρια του κατακόρυφου nnp BJT (βλ. προηγ. σχήμα) αποσκοπεί στην απομόνωση αυτής της συσκευής από γειτονικές συσκευές που κατασκευάζονται στο ίδιο υπόβαθρο.

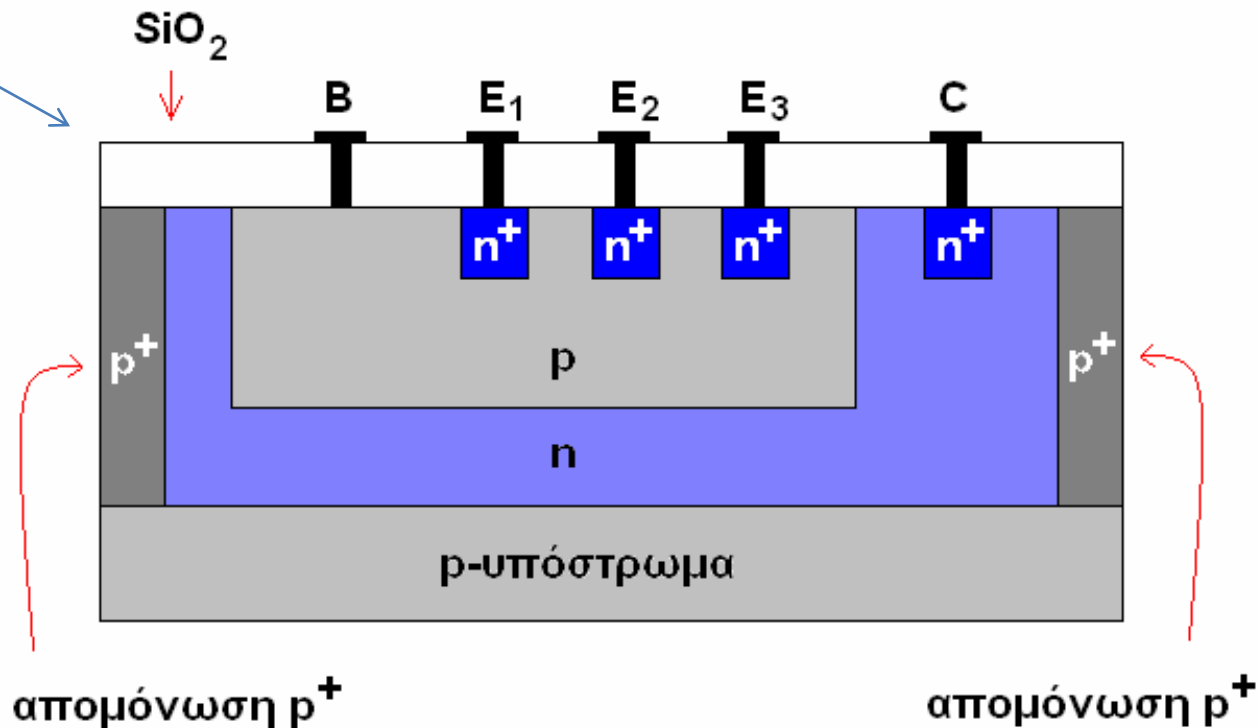
Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Στα παρακάτω 2 σχήματα παρουσιάζεται μια γενίκευση της δομής που φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα.

Τομή npn transistor
πολλαπλών εκπομπών

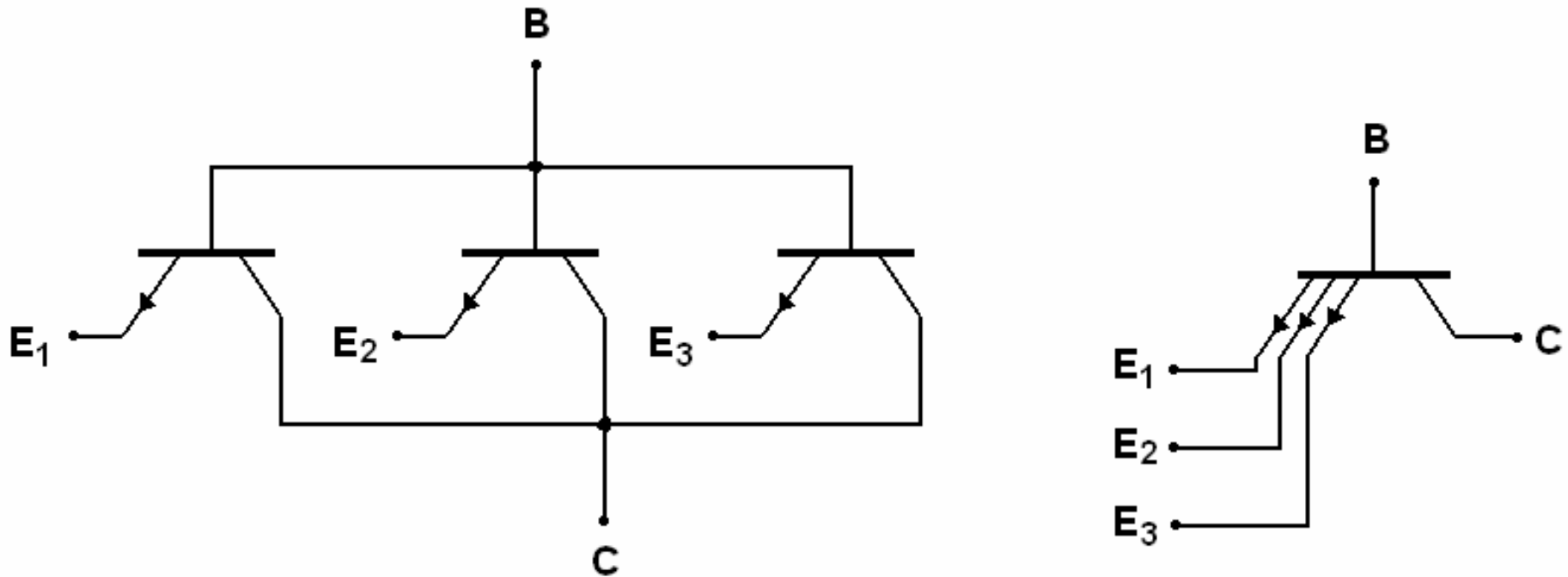


Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Ισοδύναμα κυκλώματα-σύμβολα της δομής του npn transistor πολλαπλών εκπομπών του προηγούμενου σχήματος.



Οι τρεις επαφές εκπομπού συμπεριφέρονται σαν τρεις δίοδοι κοινής ανόδου στην οικογένεια λογικής TTL.

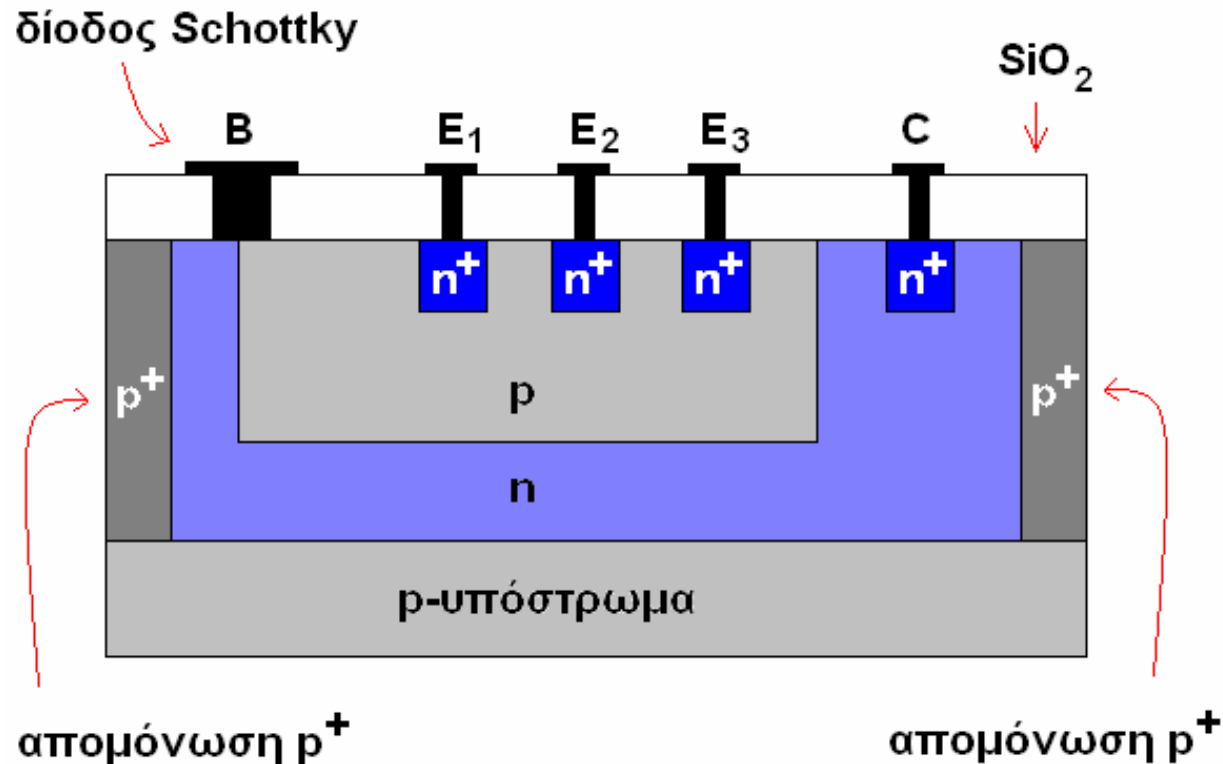
Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Στο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος παρουσιάζεται μια τροποποίηση της παραπάνω δομής, όπου ο ακροδέκτης της βάσης, ουσιαστικά, εφάπτεται και στο συλλέκτη.

Τρανζίστορ Schottky. Η βάση και ο συλλέκτης συνδέονται μεταξύ τους με δίοδο Schottky.



Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Αν η επαφή του ακροδέκτη αλουμινίου με τον n-τύπου συλλέκτη ήταν ωμική τότε θα μιλούσαμε για βραχυκύκλωμα μεταξύ βάσης και συλλέκτη.

Δε μεσολαβεί όμως κάποια διάχυση n^+ μεταξύ του n-τύπου συλλέκτη και του ακροδέκτη που συμπεριφέρεται όπως έχει ήδη αναφερθεί σαν p-περιοχή.

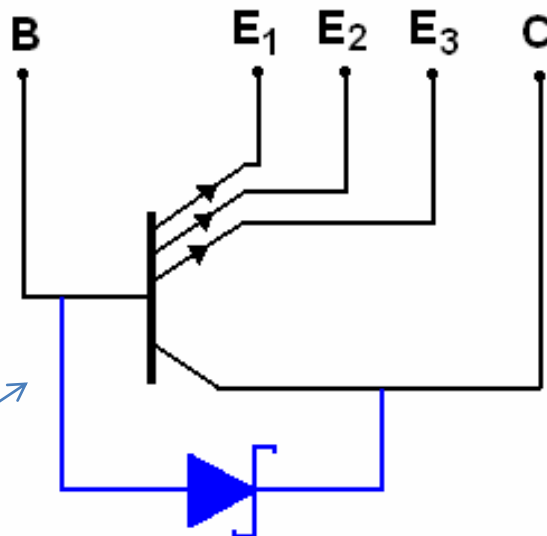
Κατά συνέπεια έχουμε **επαφή μετάλλου-ημιαγωγού** και όχι ωμική επαφή. Αυτή η επαφή ονομάζεται **δίοδος Schottky**.

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

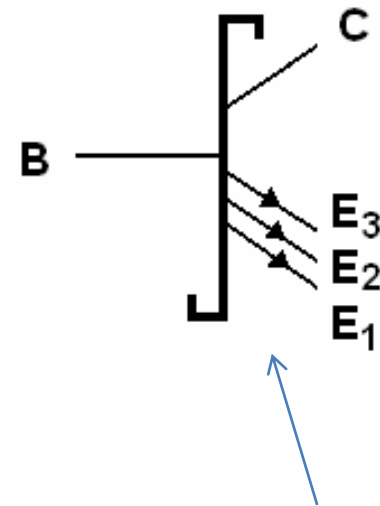
Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

Διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT).

Ο ρόλος αυτής της ένωσης βάση και συλλέκτη με δίοδο είναι να αποτρέψει το τρανζίστορ να φτάσει στον κόρο αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα μεταγωγής του (βλ. παρ. σχήμα).



Σύνδεση της βάσης με το συλλέκτη ενός τρανζίστορ διαμέσου μιας διόδου Schottky για τη δημιουργία ενός τρανζίστορ Schottky



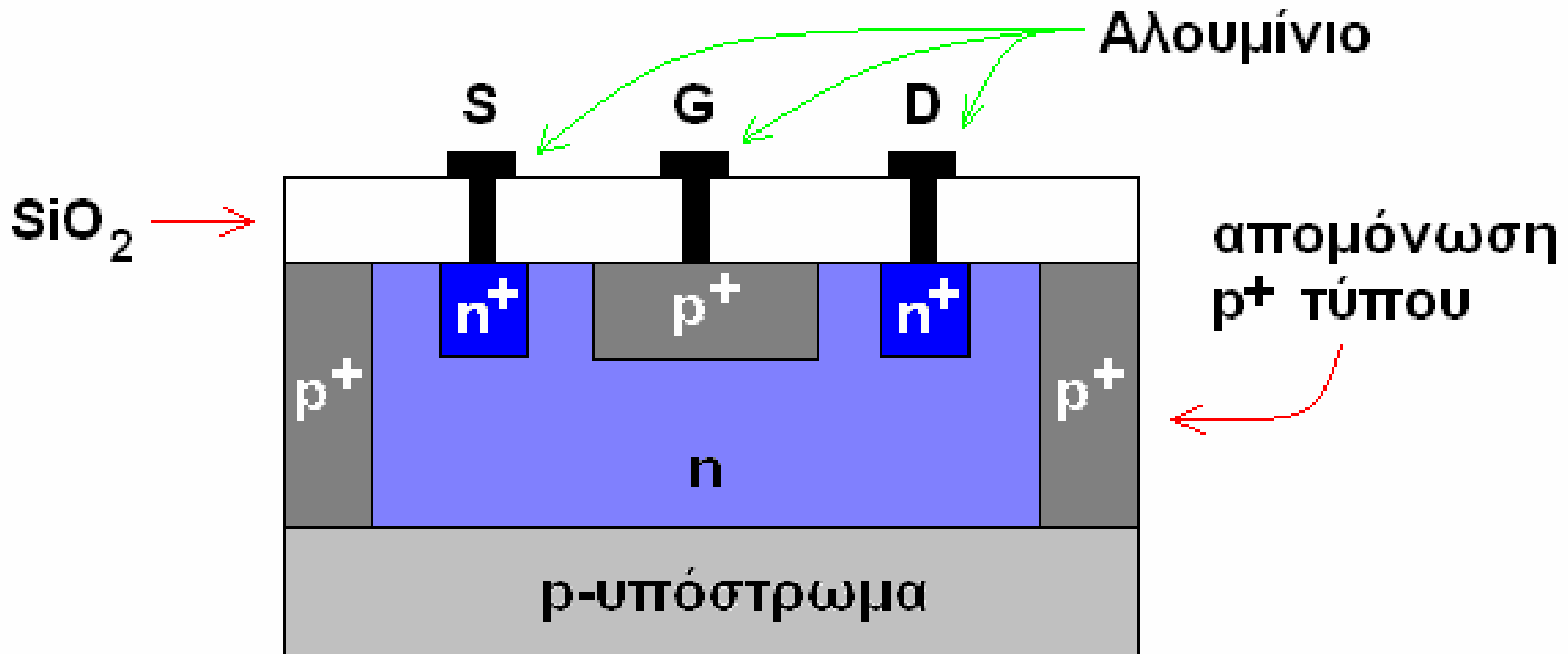
Σύμβολο του τρανζίστορ Schottky

Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

FET Επαφής (JFET)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η τομή ενός τρανζίστορ επίδρασης πεδίου επαφής (JFET) n-καναλιού.



Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής

Παραδείγματα βασικών ολοκληρωμένων δομών μικροηλεκτρονικής.

FET Επαφής (JFET)

Κατά τα γνωστά πλέον, οι περιοχές p^+ δεξιά και αριστερά της δομής έχουν διαχυθεί στο επιταξιακό στρώμα τύπου n , που θα αποτελέσει το δίαυλο (κανάλι) του FET, για να χρησιμοποιηθούν ως μόνωση από γειτονικές συσκευές που κατασκευάζονται στο ίδιο υπόστρωμα.

Η κεντρική p^+ είναι η ντοπαρισμένη περιοχή της πύλης και έχει σχηματιστεί μέσα στο n -τύπου κανάλι. Παράλληλα, οι n^+ διαχύσεις (ή εμφυτεύσεις) εντός του n -καναλιού στις περιοχές των ακροδεκτών της πηγής και του απαγωγού γίνονται για την επίτευξη καλών ωμικών επαφών.

Βιβλιογραφία

“CAD & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ” Α. ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΗΣ, Γ. ΒΕΛΝΤΕΣ, ΤΕΙ ΛΑΜΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ **“Βασικές Έννοιες Ψηφιακών Κυκλωμάτων”** Δ.Λιούπης – Μ.Στεφανιδάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών

C. C. Katsidis, “Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική”, UOC