



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Ενότητα Α: Τεχνολογία Σχεδίασης Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Κεφάλαιο 6: Απόθεση υμενίων (στιβάδων)

Αραπογιάννη Αγγελική

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

1. Σκοποί ενότητας	4
2. Περιεχόμενα ενότητας.....	4
3. Εξοπλισμός για τις διαδικασίες κενού.....	4
4. Διαδικασίες απόθεσης σε κενό.....	7
5. Το sputtering.....	9
5.1 Το DC sputtering.	9
5.2 RF sputtering.....	11
5.3 Μάγνητρον sputtering	11
5.4 Επιμετάλλωση και ανοδίωση	12
6. Χημική απόθεση ατμών (CVD)	12

1. Σκοποί ενότητας

Στο πρώτο μέρος, αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες και οι τεχνικές φυσικού σχεδιασμού και κατασκευής των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων σε 6 υποενότητες. Η έκτη υπο-ενότητα περιγράφει τον εξοπλισμό και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στη μικροηλεκτρονική για την απόθεση υμενίων.

2. Περιεχόμενα ενότητας

Υμένια από διάφορα υλικά χρησιμοποιούνται σε όλους τους τύπους μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τα υμένια αυτά μπορούν να αποτεθούν με διάφορες τεχνικές, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: η εξάχνωση, το sputtering, η επίστρωση (plating), η ανοδίωση και η χημική απόθεση ατμών. Η επιλογή της τεχνικής απόθεσης εξαρτάται από το υλικό που πρέπει να αποτεθεί, από το επιθυμητό πάχος, από τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται. Τα υμένια αυτά μπορούν να έχουν πάχος από μερικές εκατοντάδες άγκστρομς ως μερικές δεκάδες μικρά του μέτρου και μπορούν να χρησιμεύσουν σαν αγωγοί, μονωτές, αντιστάσεις και, υπό ορισμένες συνθήκες, σαν ενεργές διατάξεις.

Στη συνέχεια θα περιγραφεί ο εξοπλισμός και οι τυπικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής για την απόθεση λεπτών υμενίων. Στα παρακάτω πρέπει να προστεθεί και η μέθοδος εκτύπωσης μέσω πλέγματος, που χρησιμοποιείται για την απόθεση παχέων υμενίων κατά την κατασκευή υβριδικών κυκλωμάτων με παχέα υμένια.

3. Εξοπλισμός για τις διαδικασίες κενού.

Πολλές τεχνικές απόθεσης λεπτών στιβάδων απαιτούν συνθήκες μειωμένης πίεσης. Στα παρακάτω, σαν μονάδα μέτρησης της πίεσης θα χρησιμοποιήσουμε το torr, το οποίο ισοδυναμεί με 1mm βαρομετρικής στήλης υδραργύρου (760 mm στήλης υδραργύρου αντιστοιχούν στην ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας και σε 0°C).

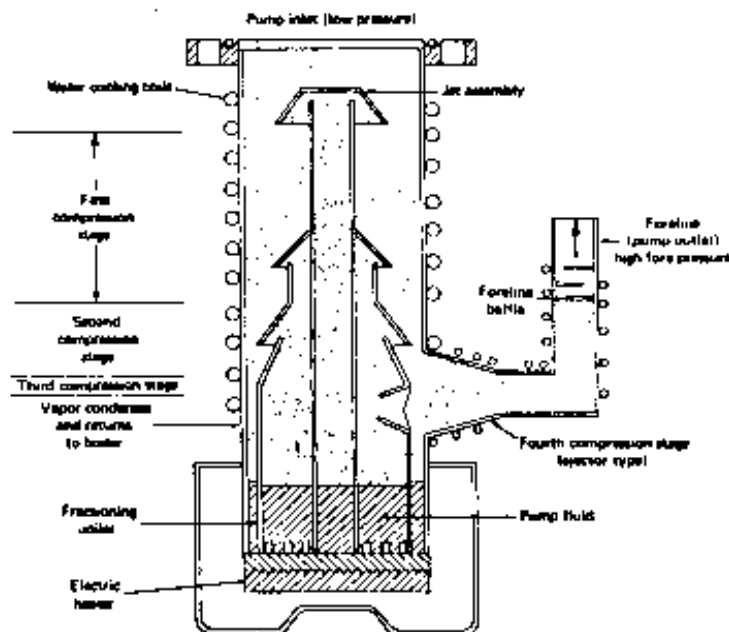
Για γρήγορη άντληση μέχρι πίεση 10^{-2} torr χρησιμοποιούνται συνήθως μηχανικές αντλίες λαδιού. Αυτές ονομάζονται συχνά αντλίες προκαταρκτικού κενού και είναι συνήθως τύπου ανεμοδείκτη ή περιστρεφόμενου εμβόλου. Ένα μειονέκτημα των μηχανικών αντλιών είναι η δυνατότητα μόλυνσης του θαλάμου που εκκενώνεται από λάδι.

Μία τεχνική ελεύθερη λαδιού για τη δημιουργία του προκαταρκτικού κενού χρησιμοποιεί τις απορροφητικές ιδιότητες των ζεολίθων. Οι ζεόλιθοι είναι κρυσταλλικές ενώσεις μετάλλων με πυρίτιο, που έχουν την ιδιότητα να αφυδατώνονται χωρίς μεταβολή του κρυσταλλικού τους πλέγματος, με αποτέλεσμα τα μόρια ορισμένων αερίων να μπορούν να καταλάβουν τις θέσεις που αφήνουν τα μόρια του νερού. Η ενεργοποίηση των ζεολίθων γίνεται με βύθιση του δοχείου που τους περιέχει, σε υγρό άζωτο. Οι αντλίες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για όγκους μικρότερους από 50 lt. Τα ίδια υλικά χρησιμοποιούνται και σαν μοριακά φίλτρα για τον καθαρισμό των αερίων.

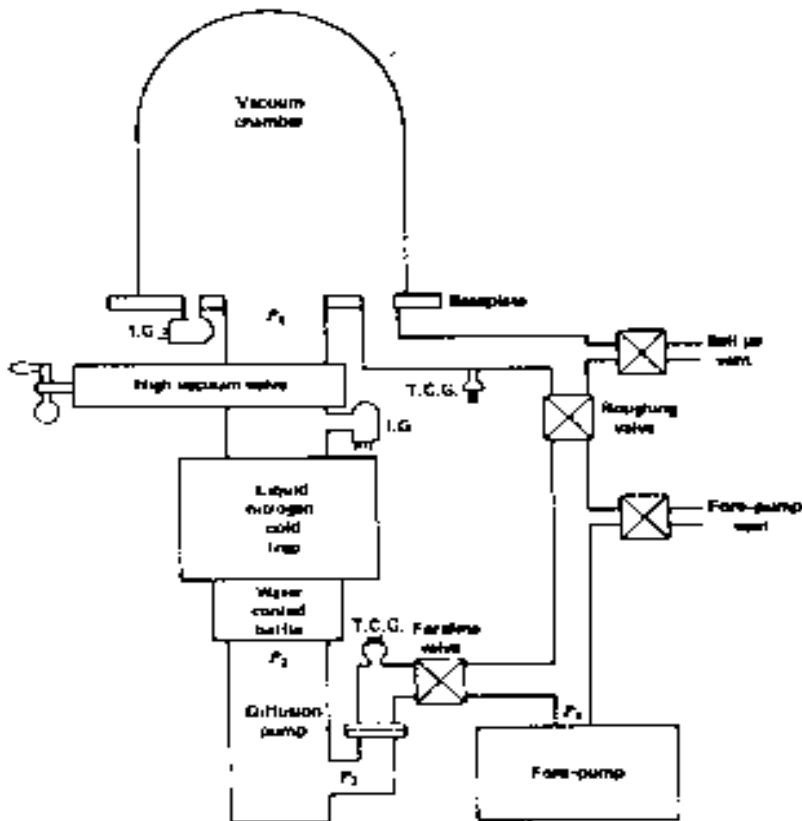
Αν απαιτούνται χαμηλότερες πιέσεις, χρησιμοποιούνται ειδικές αντλίες υψηλού κενού. Επειδή οι αντλίες υψηλού κενού είναι αποτελεσματικές μόνο αν η αρχική πίεση είναι ήδη χαμηλή, είναι απαραίτητο να προηγηθεί η χρήση μιας αντλίας προκαταρκτικού κενού για να δημιουργήσει μία πίεση περίπου 10^{-2} torr. Στη συνέχεια, ένα σύστημα βαλβίδων αποκόπτει τη γραμμή πρωτογενούς κενού.

Μία αποτελεσματική διάταξη για την επιτυχία πιέσεων κοντά στα 10^{-7} torr είναι η αντλία διάχυσης. Στο σχήμα 6.1 φαίνεται ένα διάγραμμα αντλίας διάχυσης. Ένας υγρός υδαάνθρακας με χαμηλό σημείο βρασμού θερμαίνεται στο βάθος της αντλίας. Τα μόρια του ατμού εκτινάσσονται προς τα κάτω από τους δακτυλιοειδείς εκτοξευτήρες και συμπαρασύρουν τα μόρια του αερίου, με τα οποία συγκρούονται. Έτσι, μειώνεται η συγκέντρωση του αερίου μέσα στον όγκο της αντλίας, με αποτέλεσμα τη διάχυση των μορίων του αερίου από τον θάλαμο προς την αντλία. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η πίεση του αερίου μέσα στο θάλαμο φτάσει την επιθυμητή τιμή. Επειδή μερικά από τα μόρια του ατμού της αντλίας μπορεί να διαθλαστούν προς τα πάνω μετά τη σύγκρουσή τους με τα μόρια του αερίου, τοποθετούνται μία ή περισσότερες παγίδες ανάμεσα στην αντλία και στο θάλαμο για να αποφευχθεί η μόλυνση του θαλάμου. Οι παγίδες αυτές αποτελούνται από μεταλλικά πετάσματα που εμποδίζουν την οπτική επαφή μεταξύ της αντλίας και του θαλάμου. Τα πετάσματα αυτά ψύχονται με νερό, φρέον ή υγρό άζωτο, σε τρόπο ώστε τα ζεστά μόρια του ατμού της αντλίας που έρχονται σε επαφή με τις ψυχρές επιφάνειες να ψύχονται και να συμπυκνώνονται. Το τυπικό κωδωνοειδές σύστημα κενού με αντλία διάχυσης φαίνεται στο σχήμα 6.2.

Για να επιτύχουμε ακόμη χαμηλότερες πιέσεις από ό,τι με την αντλία διάχυσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε μία αντλία ιόντων. Η αντλία ιόντων χρησιμοποιεί μία εκφόρτιση DC υψηλής τάσης ανάμεσα σε δύο πλάκες τιτανίου. Τα μόρια του αερίου ιονίζονται καθώς περνούν ανάμεσα από τις πλάκες.



Σχήμα 6. 1: Τομή μιας αντλίας διάχυσης.



Σχήμα 6. 2: Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος κενού.

Ένας μόνιμος μαγνήτης περιορίζει τα ιόντα σε διαδρομές ανάμεσα στις δύο πλάκες μέχρι να προσπέσουν στην κάθοδο. Επειδή οι αντλίες ιόντων είναι αποτελεσματικές μόνο σε χαμηλές πιέσεις, ένα τυπικό σύστημα περιλαμβάνει μία αντλία προκαταρκτικού κενού, μία αντλία καθαρισμού και μία αντλία ιόντων. Η αντλία καθαρισμού είναι ένα σύστημα που εξαχνώνει στρώματα τιτανίου πάνω σε ειδικές επιφάνειες μέσα στο σύστημα, διότι το πρόσφατα αποθετισμένο τιτάνιο απορροφά αποτελεσματικά τα μόρια του αερίου.

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση χαμηλής πίεσης έχουν διάφορες μορφές. Για τον κύκλο του προκαταρκτικού κενού συχνά χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής θερμοζεύγους. Η λειτουργία αυτού του τύπου ανιχνευτή εξαρτάται από την ικανότητα της ατμόσφαιρας που περιβάλλει ένα θερμαινόμενο νήμα να μεταφέρει τη θερμότητα από το νήμα προς ένα κύλινδρο, ο οποίος το περιβάλλει. Καθώς ο αριθμός των μορίων του αερίου μειώνεται, ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας μειώνεται επίσης. Η τάση που δημιουργείται σε ένα θερμοζεύγος που βρίσκεται σε επαφή με τον κύλινδρο χρησιμοποιείται σαν μέτρο της πίεσης.

Στις αντλίες διάχυσης ο πιο δημοφιλής ανιχνευτής είναι ο ανιχνευτής ιονισμού Bayard-Alpert. Αυτός αποτελείται από ένα θερμαινόμενο νήμα, το οποίο εκπέμπει ηλεκτρόνια, ένα ελικοειδές πλέγμα, σε θετικό δυναμικό ως προς το νήμα και μία πλάκα λεπτού σύρματος, σε αρνητικό δυναμικό ως προς το νήμα. Το σύνολο είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα του θαλάμου. Ηλεκτρόνια από το νήμα επιταχύνονται από το δυναμικό του πλέγματος και πολλά από αυτά περνάνε μέσα από τα ανοίγματα του πλέγματος και επιστρέφονται από την πλάκα. Τα ηλεκτρόνια αυτά ταλαντώνονται γύρω από το πλέγμα μέχρι να προσκρούσουν σ' ένα σύρμα του πλέγματος ή να συγκρουστούν με ένα μόριο του αερίου. Αν συμβεί μία τέτοια σύγκρουση με αρκετή ενέργεια, το μόριο μπορεί να ιονιστεί και το θετικό ιόν του αερίου θα προσελκυστεί είτε από το νήμα, είτε από την πλάκα, ανάλογα με τη θέση της

σύγκρουσης. Μόνο τα ιόντα που συλλέγονται από την πλάκα συμβάλλουν σε αναγνώσιμες ενδείξεις και το ρεύμα της πλάκας έχει βαθμολογηθεί σε μονάδες πίεσης.

Στα συστήματα αντλίας ιόντων, το ίδιο το ρεύμα τροφοδοσίας της αντλίας χρησιμοποιείται σαν ενδεικτικό της πίεσης.

4. Διαδικασίες απόθεσης σε κενό.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος απόθεσης λεπτών στιβάδων συνίσταται στη θέρμανση στερεών υλικών σε κενό μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία η πίεση των ατμών τους είναι 10^{-2} torr και συμπύκνωση των ατμών πάνω σ' ένα ψυχρότερο υπόστρωμα.

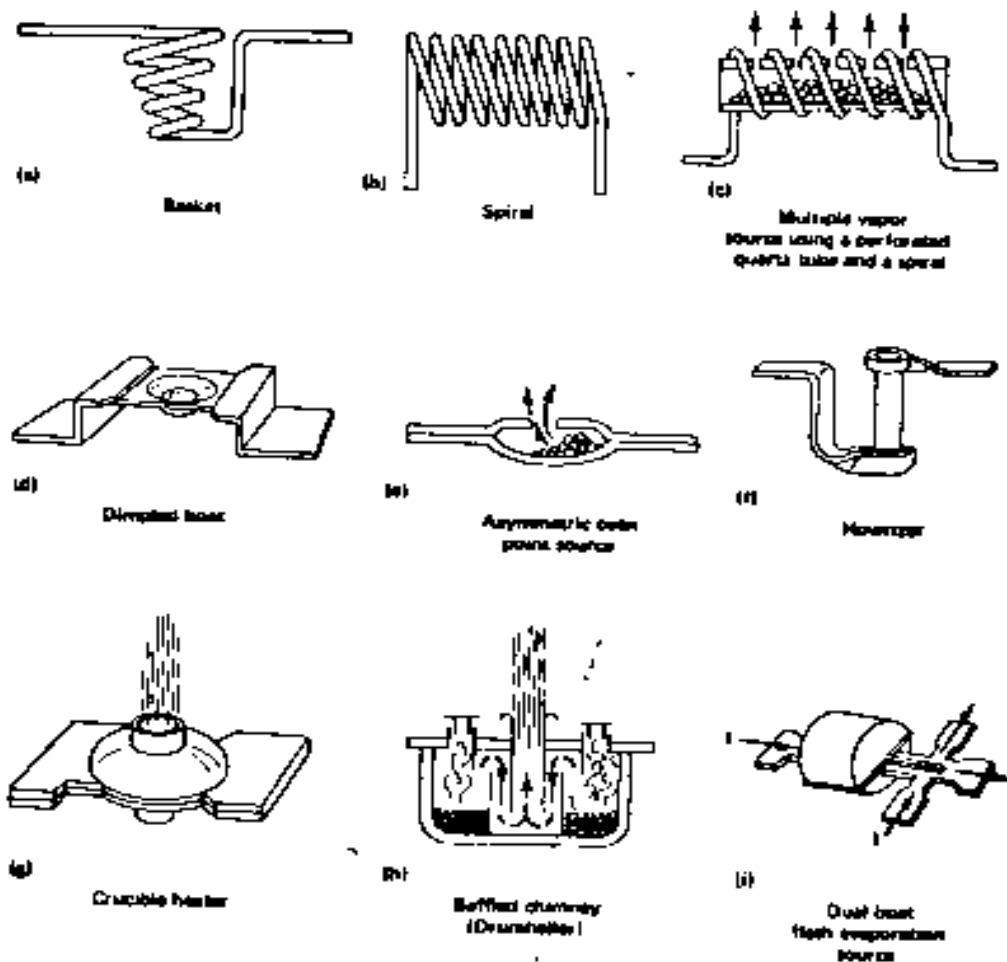
Για καλύτερη ποιότητα και ομοιομορφία της στιβάδας που αποτίθεται πρέπει το μέσο ελεύθερο βήμα μεταξύ συγκρούσεων των εξαχνωμένων ατόμων με τα μόρια του αερίου του θαλάμου να είναι μεγάλο σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ της πηγής του υλικού, που εξαχνώνεται και του υποστρώματος πάνω στο οποίο συμπυκνώνεται. Αυτό το μέσο βήμα εξαρτάται από την πίεση της ατμόσφαιρας που περιβάλλει την πηγή. Πράγματι στα 10^{-4} torr το μέσο ελεύθερο βήμα είναι 45 cm ενώ στα 10^{-6} torr φτάνει τα 45m. Για το λόγο αυτό η μέγιστη πίεση σ' ένα σύστημα εξαχνωσης είναι 10^{-5} torr. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η πίεση, τόσο καλύτερη η ποιότητα της στιβάδας. Επειδή πολλά συστήματα άντλησης γίνονται ανενεργά όταν πλησιάζουν στο ακρότατό τους χαμηλής πίεσης, γίνεται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην πίεση και στο χρόνο άντλησης, ούτως ώστε να παράγονται αποδεκτές στιβάδες σε λογικούς χρόνους.

Το βάρος του υλικού που εξαχνώνεται ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογο προς την τετραγωνική ρίζα του μοριακού βάρους του υλικού.

Ο ρυθμός απόθεσης μίας στιβάδας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι: η απόσταση μεταξύ πηγής και υποστρώματος, η σχετική γωνιακή θέση της πηγής ως προς το υπόστρωμα, η γεωμετρία της πηγής και ο συντελεστής συμπύκνωσης του εξαχνωμένου υλικού.

Τόσο ο ρυθμός απόθεσης, όσο και το πάχος της στιβάδας μπορούν να ελέγχονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόθεσης από ένα ηλεκτρονικό σύστημα, που περιλαμβάνει ταλαντωτή ελεγχόμενο από κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος αναρτάται μέσα στο θάλαμο εξαχνωσης και κοντά στα υποστρώματα. Η στιβάδα που αποτίθεται επάνω στον κρύσταλλο αλλάζει τη μάζα του και επομένως τη συχνότητα του ταλαντωτή. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται και για τον αυτόματο έλεγχο της απόθεσης.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος θέρμανσης της πηγής είναι η θέρμανση με αντίσταση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των θερμαντικών στοιχείων είναι τα ανθεκτικά μέταλλα, όπως το βολφράμιο, το μολυβδένιο, το ταντάλιο και το νιόβιο. Μερικές τυπικές μορφές θερμικών πηγών φαίνονται στο σχήμα 6.3.

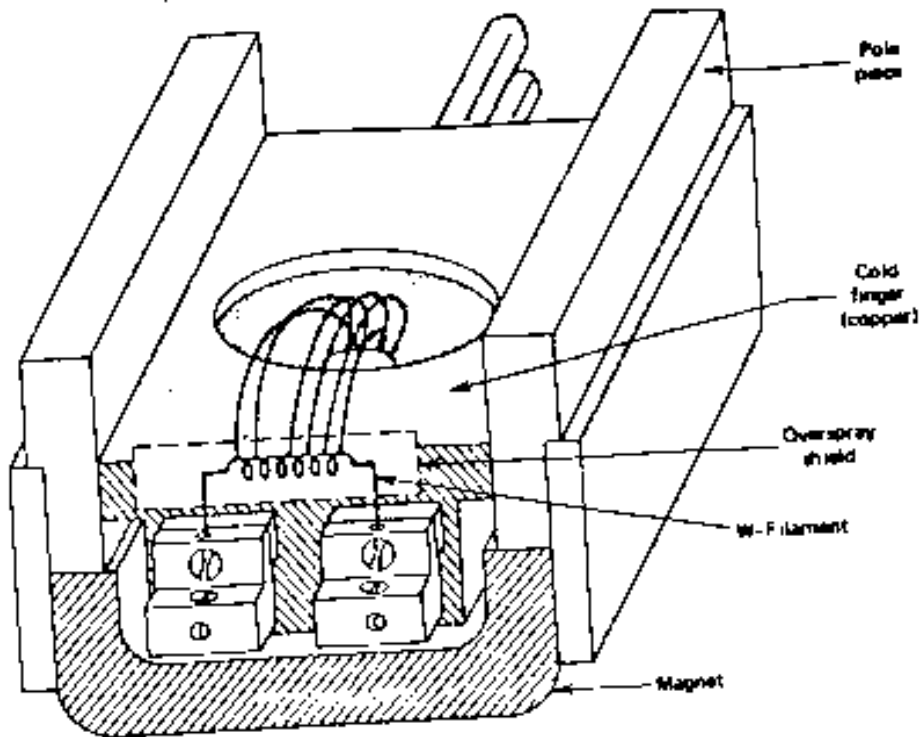


Σχήμα 6. 3: Διάφορες πηγές για θερμική εξάχνωση υλικών.

Για να επιτύχουμε ομοιόμορφη κάλυψη μεγάλου αριθμού υποστρωμάτων μπορεί να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε μία σειρά πηγές καθώς και μία βάση των υποστρωμάτων με δυνατότητα περιστροφής σε δύο διευθύνσεις.

Πολλά μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, ο χρυσός, ο χαλκός, το χρώμιο και το νικέλιο αποτίθενται με θερμική εξάχνωση. Κράματα είναι δύσκολο να εξαχνωθούν λόγω των διαφορετικών ρυθμών εξάχνωσης των συστατικών τους. Η συνηθισμένη τακτική είναι να εξαχνώνουμε ταυτόχρονα τα διάφορα στοιχεία από ξεχωριστές πηγές. Είναι επίσης δυνατόν να αποτεθούν κράματα με εξάχνωση φλας, κατά την οποία σκόνη του κράματος στάζει σε μία θερμή επιφάνεια και εξαχνώνεται σχεδόν αμέσως.

Μία άλλη προσέγγιση της θερμικής εξάχνωσης είναι η χρήση μιας εστιασμένης δέσμης ηλεκτρονίων σαν πηγής θερμότητας. Μία τέτοια διάταξη φαίνεται στο σχ. 6.4. Η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μία κηλίδα διαμέτρου περίπου 3mm. Η εξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι μία καθαρή τεχνική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόθεση μεγάλης ποικιλίας υλικών καθώς και ενώσεων και κραμάτων.



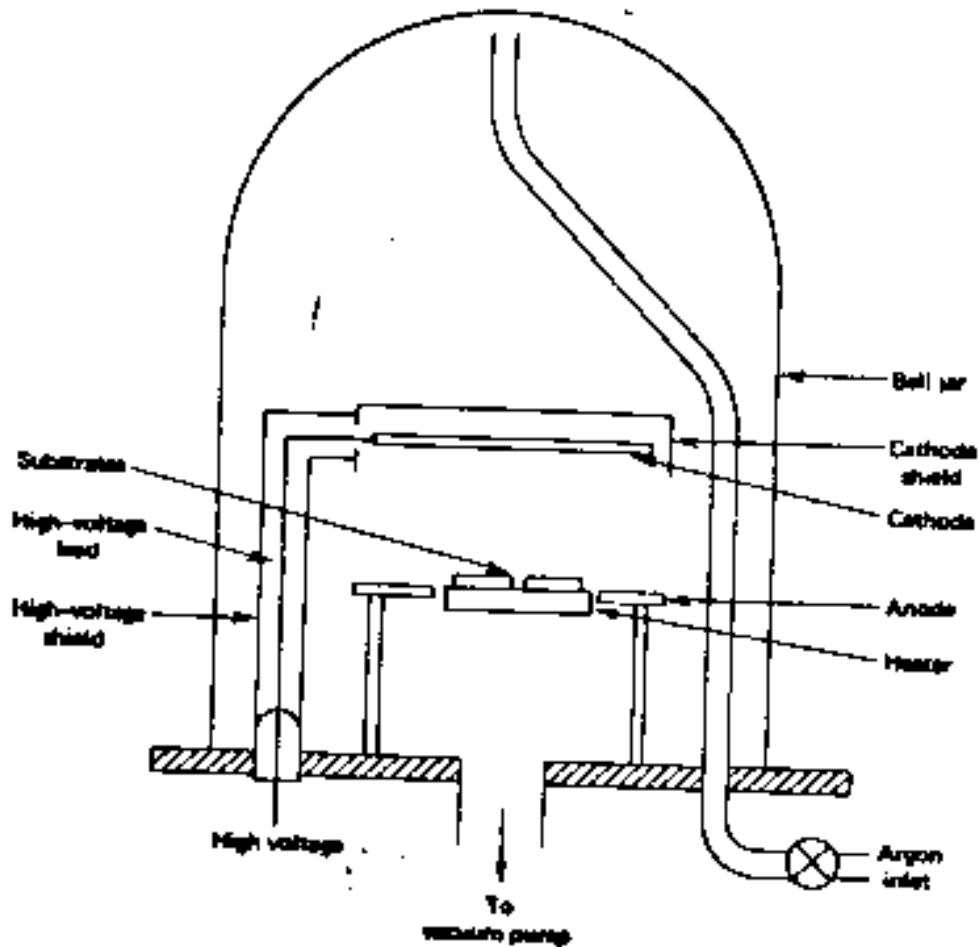
Σχήμα 6. 4: Ένα σύστημα εξαχνωσης με δέσμη ηλεκτρονίων

5. To sputtering

Sputtering είναι η διαδικασία κατά την οποία απομακρύνουμε επιφανειακά άτομα ή μόρια από την επιφάνεια ενός υλικού βομβαρδίζοντάς το με ενεργητικά ιόντα. Τα συστήματα sputtering που χρησιμοποιούνται στην μικροηλεκτρονική μπορεί να είναι του τύπου DC, RF ή μάγνητρον. Το sputtering πραγματοποιείται σε μηχανήματα κενού αλλά σε πιέσεις μεταξύ 25 και $75 \cdot 10^{-3}$ torr.

5.1 To DC sputtering.

Αγώγιμα υλικά μπορούν εύκολα να αποθεθούν σε ένα σύστημα sputtering, στο οποίο η ενέργεια ιονισμού προέρχεται από μία πηγή ισχύος συνεχούς τάσης (DC). Ένα τυπικό σύστημα DC sputtering φαίνεται στο σχήμα 6.5.



Σχήμα 6. 5: Ένα σύστημα DC sputtering.

Το υλικό που πρέπει να αποτεθεί ονομάζεται στόχος και αποτελεί την κάθοδο του συστήματος ενώ τα υποστρώματα τοποθετούνται στην άνοδο πάνω σ' ένα θερμαινόμενο υπόστρωμα σε απόσταση 1 ως 12 cm από την κάθοδο. Ο θάλαμος εκκενώνεται σε συνθήκες υψηλού κενού και κατόπιν ξαναγεμίζεται με αργόν πολύ υψηλής καθαρότητας μέχρι την τιμή πίεσης που χρειάζεται για το sputtering.

Στη συνέχεια εγκαθίσταται μία εκφόρτιση αίγλης μεταξύ ανόδου και στόχου, με αποτέλεσμα να αποσπώνται άτομα από την επιφάνεια του στόχου και να πέφτουν πάνω στα υποστρώματα σχηματίζοντας μία σπιβάδα. Κάθε υλικό έχει μία χαρακτηριστική απόδοση sputtering, δηλ. ορισμένο αριθμό ατόμων που απομακρύνονται από τον στόχο ανά προσπίπτον ιόν και ο οποίος είναι συνάρτηση της ενέργειας του ιόντος. Ο ρυθμός απόθεσης στα υποστρώματα εξαρτάται από την απόδοση sputtering και το ρεύμα ιόντων.

Για την απόθεση μονωτών χρησιμοποιείται μία άλλη διαδικασία που ονομάζεται αντιδραστικό DC sputtering. Ένα δραστικό αέριο, όπως το οξυγόνο, αναμιγνύεται με το αέριο του sputtering με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μία ένωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Είναι δύσκολο να σχηματιστεί μ' αυτό τον τρόπο μία στοιχειομετρική ένωση και χρειάζεται να ανοιπηθεί σε υψηλή θερμοκρασία το οξειδίο που κατασκευάζεται μ' αυτό τον τρόπο. Η ανοίπηση αυτή συχνά πραγματοποιείται μέσα στο ίδιο το σύστημα του sputtering.

Συνήθως είναι επιθυμητό να κάνουμε έναν επί τόπου καθαρισμό των υποστρωμάτων πριν από την απόθεση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ανάστροφο sputtering και βασίζεται στην αναστροφή της πολικότητας του τροφοδοτικού σε τρόπο ώστε sputtering να συμβαίνει πάνω στα υποστρώματα και όχι στο στόχο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε πολύ καθαρό υπόστρωμα για την απόθεση.

5.2 RF sputtering

Με μία διαδικασία RF sputtering μπορούν να αποτεθούν τόσο μονωτές όσο και αγωγοί.

Η γεωμετρία του συστήματος είναι βασικά η ίδια όπως και στο σύστημα DC sputtering και μόνο το τροφοδοτικό DC αντικαθίσταται από ένα πεδίο RF. Επίσης για να περιοριστεί η εκφόρτιση στην περιοχή του στόχου, τοποθετούνται πηνία γύρω από τον κώδωνα, τα οποία δημιουργούν αξονικό μαγνητικό πεδίο.

Αν ο στόχος είναι μονωτής το σύστημα RF sputtering λειτουργεί ως εξής: Επειδή τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που δημιουργούνται με την εκφόρτιση έχουν πολύ διαφορετικές μάζες, περισσότερα ηλεκτρόνια χτυπάνε στο στόχο κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου κατά τον οποίο ο στόχος είναι θετικός παρά θετικά ιόντα όταν ο στόχος είναι αρνητικός. Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης συγκεντρώνεται ένα πλεόνασμα αρνητικού φορτίου πάνω στο μονωτή δημιουργώντας αρνητική πόλωση ανάμεσα στο στόχο και στην άνοδο. Από 'κει και πέρα το sputtering πραγματοποιείται με τρόπο παρόμοιο με το DC sputtering.

Αν ο στόχος είναι αγωγίμος πρέπει να έχει χωρητική σύζευξη με την κάθοδο ούτως ώστε να δημιουργείται συνεχής πόλωση. Η ολική απόδοση του RF sputtering για την απόθεση αγωγών είναι χαμηλότερη από του DC sputtering.

5.3 Μάγνητρον sputtering

Ο ρυθμός απόθεσης ενός συστήματος DC sputtering μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση μαγνητικών πεδίων, που αυξάνουν την ένταση της εκφόρτισης του αερίου.

Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από μόνιμους μαγνήτες και προσανατολίζεται έτσι ώστε να είναι περίπου παράλληλο προς την επιφάνεια του στόχου. Σ' αυτού του τύπου τα συστήματα χρησιμοποιούνται επιπεδικοί και κωνικοί στόχοι, οι οποίοι ψύχονται με νερό. Τα υποστρώματα αναρτώνται σε πλανηταριακή βάση, η οποία είναι ανεξάρτητη από την άνοδο. Με το σύστημα DC μάγνητρον sputtering επιτυγχάνουμε υψηλούς ρυθμούς απόθεσης για το αλουμίνιο, για τα κράματα αλουμινίου/2% πυρίτιο και αλουμίνιο/4% χαλκό/2% πυρίτιο. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά ορισμένων τύπων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Επειδή, όπως είδαμε, η εξάχνωση κραμάτων εμφανίζει δυσκολίες λόγω των διαφορετικών ρυθμών εξάχνωσης των διαφόρων υλικών, το sputtering με μάγνητρον αντιπροσωπεύει μία σημαντική βελτίωση στην απόθεση κραμάτων.

Μπορεί επίσης να συνδυαστεί RF sputtering με μάγνητρον για την απόθεση SiO_2 . Επειδή στην τυπική RF sputtering ο βομβαρδισμός των υποστρωμάτων από ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα προκαλεί υποβάθμιση του αποτιθέμενου στρώματος και θέρμανση των υποστρωμάτων, η προσθήκη ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου παράλληλα προς τα υποστρώματα, τα προστατεύει από αυτόν τον βομβαρδισμό και επιτρέπει υψηλότερο ρυθμό απόθεσης.

5.4 Επιμετάλλωση και ανοδίωση

Σε μερικές εφαρμογές είναι επιθυμητό να αυξηθεί το πάχος μίας αγώγιμης στιβάδας για να μειωθεί η αντίστασή της. Μία οικονομική μέθοδος είναι να αποθέσουμε το υλικό αυτό με ηλεκτρική επιμετάλλωση. Παρόμοια διαδικασία, που χρησιμοποιείται για την απόθεση διηλεκτρικών στιβάδων είναι η ανοδίωση.

Η ηλεκτρική επιμετάλλωση χρησιμοποιεί σαν ηλεκτρολύτες υδατικά διαλύματα αλάτων των μετάλλων. Μία πηγή συνεχούς συνδέεται έτσι ώστε τα υποστρώματα να είναι η κάθοδος και το μέταλλο, που θα επιστρωθεί, η άνοδος. Ο ρυθμός απόθεσης εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος μέσα στο διάλυμα.

Η ανοδίωση χρησιμοποιείται για το σχηματισμό λεπτών στιβάδων διηλεκτρικού ποιότητας, πάνω σε μέταλλο ή ημιαγωγό. Σ' αυτή την περίπτωση το υπόστρωμα συνδέεται στον θετικό πόλο του τροφοδοτικού. Η ανοδίωση περιορίζεται σε μέταλλα και ημιαγωγούς που φτιάχνουν εκ φύσεως σύμφωνες (coherent) στιβάδες οξειδίων, όπως είναι το αλουμίνιο, το ταντάλιο και το πυρίτιο. Το ταντάλιο είναι δημοφιλές υλικό για την κατασκευή αντιστάσεων λεπτής στιβάδας. Η ανοδίωση του πυριτίου αποτελεί τμήμα μιας διαδικασίας χαρακτηρισμού για τον προσδιορισμό της κατανομής των προσμίξεων.

Η διαδικασία της ανοδίωσης πραγματοποιείται συχνά με σταθερή πυκνότητα ρεύματος, πράγμα που απαιτεί αύξηση της τάσης καθώς αναπτύσσεται το οξείδιο ώστε να διατηρείται το ηλεκτρικό πεδίο σταθερό. Αν κατασκευάζεται το διηλεκτρικό πυκνωτού, το τελευταίο τμήμα της διαδικασίας πραγματοποιείται με σταθερή τάση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη βραδεία ανάπτυξη αλλά ένα στρώμα διηλεκτρικού υψηλής ποιότητας.

6. Χημική απόθεση ατμών (CVD)

Χημική απόθεση ατμών είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία, κατά την οποία μία στιβάδα αποτίθεται με χημική αντίδραση ή πυρολυτική αποσύνθεση από την αέρια φάση σε γειννίαση με το υπόστρωμα. Η επιταξία είναι ένα τυπικό παράδειγμα CVD. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα CVD, που εργάζονται σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας, χαμηλής πίεσης και με τη βοήθεια πλάσματος, ενώ τυπικές εφαρμογές της μεθόδου στην μικροηλεκτρονική είναι η απόθεση διοξειδίου του πυριτίου, νιτριδίου του πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Η θερμική οξείδωση του πυριτίου παράγει, όπως είδαμε, στιβάδες SiO_2 υψηλής ποιότητας. Εφαρμόζεται όμως μόνο σε υποστρώματα πυριτίου ενώ συχνά χρειάζεται να αποθεθεί SiO_2 πάνω σε υπάρχοντα οξείδια, μέταλλα ή στιβάδες νιτριδίου. Ένα παχύ στρώμα οξειδίου μπορεί να αποθεθεί με οξείδωση του σιλανίου (SiH_4) ή ενός από τα χλωροσιλάνια (SiCl_4 , SiHCl_3 , SiH_2Cl_2) είτε με N_2O είτε με CO_2 σε θερμοκρασίες μεταξύ 800 και 1000°C. Τα οξείδια αυτά είναι υψηλής ποιότητας, αλλά κατώτερα από τα θερμικά και συχνά χρησιμοποιούνται σαν οξείδια πεδίου των δομών MOS.

Το νιτρίδιο του πυριτίου χρησιμοποιείται σαν στιβάδα παθητικοποίησης (passivation) σε μερικά διπολικά Ο.Κ. καθώς και σαν συστατικό των μονωτών πύλης πολλαπλών στιβάδων των κυκλωμάτων MOS. Το τυπικό σύστημα CVD απόθεσης νιτριδίου χρησιμοποιεί την αντίδραση σιλανίου και αμμωνίας σε θερμοκρασία μεταξύ 600 και 800°C με αέριο φορέα άζωτο.

Η CVD χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργεί σε συνθήκες συνεχούς απόθεσης. Τα υποστρώματα δηλ. περνάνε μέσα από μία κουρτίνα αζώτου ενώ θερμαίνονται στη θερμοκρασία απόθεσης, μεταφέρονται στο θάλαμο αντίδρασης και κατόπιν εγκαταλείπουν το σύστημα μέσα από μία άλλη κουρτίνα αζώτου.

Η CVD σε ατμοσφαιρική πίεση πραγματοποιείται συνήθως σε αντιδραστήρα με κρύα τοιχώματα, ώστε να μειώνεται στο ελάχιστο η απόθεση στα τοιχώματα, η οποία υποβαθμίζει την αποτιθέμενη στιβάδα, λόγω των σωματίων που πέφτουν από τα τοιχώματα πάνω στα υποστρώματα. Τα υποστρώματα τοποθετούνται επίπεδα πάνω σε έναν υποδοχέα που θερμαίνεται με RF.

Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί και συστήματα CVD που λειτουργούν υπό μειωμένη πίεση, της τάξης των 0,5 ως 1 torr. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν θαλάμους αντίδρασης με θερμά τοιχώματα, με τα υποστρώματα αναρτημένα κατακόρυφα, όπως στους φούρνους θερμικής οξειδωσης. Σ' ένα τέτοιο σύστημα η χωρητικότητα υποστρωμάτων είναι πολύ υψηλότερη και η ανάγκη αερίων φορέων πολύ μειωμένη. Η ομοιομορφία απόθεσης είναι επίσης καλύτερη στα συστήματα χαμηλής πίεσης (LPCVD) και γενικά τα συστήματα αυτά εμφανίζουν οικονομικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συστήματα CVD σε ατμοσφαιρική πίεση.

Η βελτίωση της CVD από πλάσμα έχει χρησιμοποιηθεί για αποθέσεις νιτριδίου του πυριτίου και οξειδίου του πυριτίου. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του πλάσματος με εκφόρτιση αίγλης είναι ότι η ηλεκτρονική θερμοκρασία μέσα στο πλάσμα είναι 10 ως 100 φορές μεγαλύτερη από τη μέση θερμοκρασία των μορίων του αερίου. Αυτό σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, τα μόρια του αερίου μπορούν να διατηρούνται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ενώ η ηλεκτρονική ενέργεια είναι αρκετή να διασπάσει μοριακούς δεσμούς και να οδηγήσει στη δημιουργία χημικά ενεργών στοιχείων. Τα αποτελέσματα της απόθεσης με τη βοήθεια πλάσματος στους 240°C και σε πίεση 0,2 torr στο σιλάνιο, την αμμωνία και το άζωτο είναι όμοια με αυτά της απόθεσης σε συνηθισμένο αντιδραστήρα στους 800°C.

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. Ενότητα 6: Απόθεση υμενίων (στιβάδων)». 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 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6: 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.

