

Τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

του Ι. Ν. Αβαριτσιωτή

Περίληψη

Η τελευταία λέξη της σύγχρονης ηλεκτρονικής τεχνολογίας είναι η ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας (Very Large Scale Integration - VLSI). Από την εποχή που πρωτοεμφανίστηκε το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα (1975), η κατασκευαστική τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είχε αλματώδη ανάπτυξη: Το ελάχιστο χαρακτηριστικό μήκος μειώνεται με ρυθμό της τάξης του 13% ετησίως, ενώ η πυκνότητα στοιχείων σε τσιπς που κατασκευάζονται με ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας αυξάνεται κατά 40% ανά έτος. Μέχρι το τέλος του αιώνα μας, τα χρησιμοποιούμενα υπόβαθρα πυριτίου προβλέπεται να φτάσουν τα 25 εκατοστά σε διάμετρο, ενώ οι μεν θερμοκρασίες επεξεργασίας θα πέσουν σε τιμές μικρότερες των 800°C, το δε ελάχιστο χαρακτηριστικό μήκος σε τιμή μικρότερη των 0,2 μm. Οι ανάγκες της αγοράς παίρνουν καθημερινά όλο και μεγαλύτερες διαστάσεις και, προκειμένου να καλυφθούν, θα χρειαστεί να κατασκευαστούν υπερ-εξειληγμένα ολοκληρωμένα VLSI κυκλώματα με εκατομμύρια στοιχεία και ενσωματωμέ-

νη οργάνωση επί του τσιπ. Θα δούμε αναλυτικότερα τα κυριότερα βήματα αυτής της εξελικτικής πορείας, καθώς και τις μελλοντικές τάσεις της τεχνολογίας αυτής.

1. Εισαγωγή

Η βιομηχανία ηλεκτρονικών έχει αναπτυχθεί αλματωδώς τα τελευταία χρόνια. Οι πωλήσεις στις Η.Π.Α. π.χ. έχουν πενταπλασιαστεί μετά την εμφάνιση του VLSI το 1975, περνώντας από τα 223 δις \$ το 1987 στο 1 τρις \$ (πρόβλεψη) μέχρι το τέλος της δεκαετίας που διανύουμε, με ρυθμό αύξησης 12% ετησίως. Η αγορά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει αναπτυχθεί με ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς. Ενώ το 1987 οι πωλήσεις ολοκληρωμένων στις Η.Π.Α. ήταν 12 δις \$, μέχρι το έτος 2000 προβλέπεται να φτάσουν τα 90 δις \$ με ρυθμό αύξησης περίπου 16% ετησίως. Δύο είναι οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους σημειώθηκε αυτή η αλματώδης ανάπτυξη. Η γενικότερη διάδοση των προϊόντων ηλεκτρονικής, καθώς και η συνεχής πρόοδος της τεχνολογίας ολοκληρωμένων. Η παγκόσμια αγορά ηλεκτρονικών (που είναι σχεδόν διπλάσια σε μέγεθος της Αμερικανικής) προβλέπεται να σημειώσει παρόμοια ανάπτυξη. Μέχρι το τέλος του αιώνα προβλέπεται να ξεπεράσει σε ύψος πωλήσεων την αγορά αυτοκινήτων, χημικών και προϊόντων χάλυβα.

Η αύξηση των ηλεκτρονικών στοιχείων που περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο υπήρξε εκθετική. Η πολυπλοκότητα ολοκληρωμένων MOSFET πυριτίου ξεπερνά σήμερα τα 10⁵ στοιχεία ανά τσιπ (VLSI) έχοντας περάσει από

τα στάδια ολοκλήρωσης μικρής κλίμακας (SSI), μέσης κλίμακας (MSI) και μεγάλης κλίμακας (LSI). Αν και ο ρυθμός αυτής της αλματώδους ανάπτυξης έχει σημειώσει μικρή κάμψη τα τελευταία χρόνια, λόγω δυσκολιών που παρουσιάζονται στο σχεδιασμό και τις διαδικασίες κατασκευής πολύπλοκων ολοκληρωμένων, η πυκνότητα στοιχείων προβλέπεται να φτάσει τα 10⁸ στοιχεία ανά τσιπ, πριν το έτος 2000. Οι τεχνολογίες διπολικής και MESFET (metal semiconductor field effect transistor), είναι ακόμα στα επίπεδα μέσης (MSI) ή μεγάλης (LSI) ολοκλήρωσης. Τα αίτια για την τόσο γρήγορη μετάβαση της τεχνολογίας MOSFET στο επίπεδο ολοκλήρωσης πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSI), είναι τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή σε σχέση με τις άλλες όσον αφορά την δυνατότητα σμίκρυνσης στοιχείων, την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας που διανύουμε, τα ολοκληρωμένα τεχνολογίας MOS θα κυριαρχούν στην αγορά ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, και μάλιστα θα διεκδικούν μεγάλο μερίδιο των κερδών από τις πωλήσεις ημιαγωγών γενικά. Όσον αφορά λοιπόν το VLSI, θα στρέψουμε την προσοχή μας στην τεχνολογία MOS.

2. Σμίκρυνση στοιχείων

Ο σημαντικότερος παράγοντας για την επίτευξη πολυπλοκότητας στο VLSI είναι η συνεχής μείωση του ελαχίστου χαρακτηριστικού μήκους. Από τις αρχές της δεκαετίας του '60 ο

Ο Ι. Ν. Αβαριτσιωτής είναι καθηγητής στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ. Το άρθρο έχει δημοσιευθεί στο «Micro ΗΛΕΚΤΡΟΝ» που είναι έκδοση του Συλλόγου Σπουδαστών Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ.

ετήσιος ρυθμός μείωσής του, όσον αφορά ολοκληρωμένα κυκλώματα για εμπορικές εφαρμογές, ήταν 13%. Αν ο ρυθμός αυτός συνεχιστεί, μέχρι το έτος 2000 θα έχουμε φτάσει στα 0,2 μμ.

Καθώς το μήκος πύλης μειώνεται σε κλάσματα του μμ, πρέπει και άλλες διαστάσεις του στοιχείου να μειωθούν προκειμένου ν' αποφευχθεί το φαινόμενο «short channel». Η μείωση του βήθους της επαφής πηγής - καταβόθρας, καθώς και η μείωση του πάχους του οξειδίου πύλης ακολουθεί επίσης ρυθμό 13% ετησίως.

Η σμίκρυνση των στοιχείων οδηγεί σε μείωση του κόστους μιας διάταξης ανά πραγματοποιούμενη λειτουργία, καθώς και σε βελτίωση της λειτουργικότητας. Για παράδειγμα το κόστος ανα bit μνήμης (για τα τσιπ μνήμης) υποδιπλασιάζεται ανά δύο χρόνια για κάθε επερχόμενη γενιά DRAM (δυναμικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης). Μέχρι το έτος 2000, το κόστος ανά bit θα πέσει σε τιμές μικρότερες από το 10^{-6} \$ για τσιπ μνήμης των 64 Mbit. Παρόμοια μείωση του κόστους προβλέπεται να έχουμε και για τα τσιπ λογικής που πραγματοποιούνται με τεχνολογία VLSI.

Καθώς μειώνονται οι διαστάσεις των στοιχείων, η εσωτερική συχνότητα χρονισμού των MOSFET αυξάνεται. Η ταχύτητα των στοιχείων έχει εκατονταπλασιαστεί από το 1975. Οι υψηλές ταχύτητες οδηγούν σε αύξηση της λειτουργικότητάς τους. Μέχρι το 2000 τα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα θα μπορούν να πραγματοποιούν επεξεργασία δεδομένων, αριθμητικούς υπολογισμούς και έλεγχο σήματος με ρυθμούς που θα υπερβαίνουν τα 10 Gbit/sec.

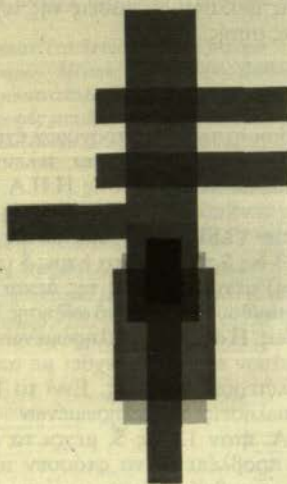
Ένα ακόμη πλεονέκτημα της σμίκρυνσης είναι η μείωση της κατανάλωσης ισχύος. Καθώς το μέγεθος ενός στοιχείου μειώνεται, αυτό καταναλώνει και λιγότερη ισχύ. Επομένως η σμίκρυνση των στοιχείων οδηγεί και σε μείωση της ενέργειας που καταναλώνει κάθε άνοιγμα-κλεισίμο διακοπών. Από το '75 η ενέργεια που καταναλώνεται ανά λειτουργία διακοπής έχει μειωθεί κατά 3 τάξεις μεγέθους. Τα προβλήματα που πρέπει ν' αντιμετωπιστούν προκειμένου να επιτευχθούν σμικρύνσεις ελαχίστου χαρακτηριστικού μήκους μικρότερου των 0,2 μμ, ξεφεύγουν από τα πλαίσια των στοιχειωδών ορίων των διατάξεων. Η συμπεριφορά στοιχείων με διαστάσεις μικρότερες των 0,2 μμ, επηρεάζεται έντονα από το φαινόμενο της αποκοπής σε τάσεις μικρότερες ενός κατωφλίου,

από στατιστικά φαινόμενα λόγω ακαθαρσιών στο κανάλι, όπως και από το φαινόμενο διδιάστατου πεδίου (two dimensional field effect).

Σ' αυτά έρχονται να προστεθούν και φαινόμενα βαλλιστικής μετατόπισης των φορέων, αδρανειακής υπέρβασης των ορίων της μετατόπισης, ή ακόμα και διαδικασίες μετατόπισης των φορέων που έχουν κβαντική προέλευση και συνεπάγονται την αλλοίωση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της διάταξης.

3. Κατασκευαστικές διαδικασίες στο VLSI

Η συρρίκνωση του ελαχίστου χαρακτηριστικού μήκους στην περιογή των μμ, συνεπάγεται και τη σταδιακή αυτοματοποίηση των κατασκευαστικών βημάτων στο VLSI, που βέβαια εξασφαλίζει καλύτερο έλεγχο των κατασκευαστικών παραμέτρων. Γίνονται διαρκώς νέες βελτιώσεις σε κάθε κατασκευαστικό στάδιο, από την ανάπτυ-



ξη του κρυστάλλου και μέχρι το πακετάρισμα του τσιπ.

3.1. Πυρίτιο κρυστάλλου κυρίου όγκου και επιταξία

Τα μοναδικά πλεονεκτήματα του πυριτίου, όπως είναι το επαρκές ενεργειακό χάσμα, το σταθερό οξείδιο και ακόμη η αφθονία του στη φύση, εξασφαλίζουν ότι κανένα άλλο ημιαγωγικό υλικό δεν θα απειλήσει την κυριαρχία του πυριτίου σε VLSI εφαρμογές (σήμερα το 95% των ημιαγωγών διατάξεων της αγοράς έχουν σαν βάση τους το πυρίτιο).

Η διάμετρος του κυρίως κρυστάλλου πυριτίου που κατασκευάζεται διεθνώς αυξάνεται με ρυθμό 10% ετησίως και βρίσκεται σήμερα στο επίπεδο των 150

mm (βέβαια έχουν αναπτυχθεί και κρυστάλλοι διαμέτρου μεγαλύτερης από 350 mm). Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους των σύγχρονων τσιπ είναι ίδιος με το ρυθμό αύξησης της διαμέτρου του κρυστάλλου. Ο λόγος της διαμέτρου του κυρίως κρυστάλλου προς το μέσο των τσιπ που κατασκευάζονται, διατηρείται σταθερός (περίπου ίσος με 20). Μέχρι το τέλος της δεκαετίας η διάμετρος του κρυστάλλου θα φτάσει τα 250 mm, ενώ το μήκος κάθε τσιπ προβλέπεται να συρρικνωθεί στην περιοχή των 15-20 mm.

Το συνολικό εμβαδό των παραχθέντων κρυστάλλων είναι αυτή τη στιγμή περίπου 2×10^{10} cm². Το εμβαδό αυτό προβλέπεται να φτάσει το 10^{11} cm² μέχρι το έτος 2000. Η παραγωγή συμπαγών ημιαγωγών τύπου III-V θα παραμείνει σχετικά χαμηλά σε σύγκριση με την παραγωγή πυριτίου (περίπου 10^9 cm² μέχρι το έτος 2000).

Μια εναλλακτική τεχνική ανάπτυξης κρυστάλλου είναι και η επιταξία. Προσφέρει κατανομές προσμίξεων και ιδιότητες υλικού που είναι αδύνατο να επιτευχθούν με άλλες γνωστές μεθόδους. Καθώς συρρικνώνονται οι διαστάσεις των κατασκευαζομένων διατάξεων, η βελτίωση των επιδόσεων των κυκλωμάτων και η δημιουργία νέας δομής βασίζεται κυρίως σε δύο μεθόδους: Την επιταξία χαμηλών θερμοκρασιών (π.χ. επιταξία μοριακής δέσμης ή χημική εναπόθεση ατμών με μεταλλοργανικά) και τα υπόβαθρα πυριτίου επί μονωτού (π.χ. πυρίτιο πάνω σε διοξείδιο του πυριτίου που παρασκευάζεται με εμφύτευση οξυγόνου).

3.2. Οξείδωση και εμφύτευση.

Το πάχος του οξειδίου πύλης είναι σήμερα περίπου 150Å. Όπως φαίνεται, θα χρειαστούν λεπτότερα οξείδια σε μελλοντικές διατάξεις. Η βελτίωση της ποιότητας των λεπτών οξειδίων έχει μεγάλη σημασία λόγω της σχέσης που υπάρχει μεταξύ αυτού ακριβώς του οξειδίου και των μεγάλων προβλημάτων αξιοπιστίας των VLSI τσιπ. Η τάση που επικρατεί στις κατασκευαστικές διαδικασίες αυτής της τεχνολογίας, είναι προς χαμηλότερες θερμοκρασίες ή/και μικρότερους χρόνους, προκειμένου να διατηρηθούν οι διαστάσεις των διατάξεων μικρές. Χρησιμοποιούνται επομένως προηγμένες τεχνικές οξείδωσης, όπως π.χ. η μέθοδος οξείδωσης σε μέση θερμοκρασία και υψηλή πίεση καθώς και η μέθοδος της ταχείας θερμικής επεξεργασίας που συνίσταται στην έκθεση της επιφάνειας του πυριτίου σε οξειδωτικό

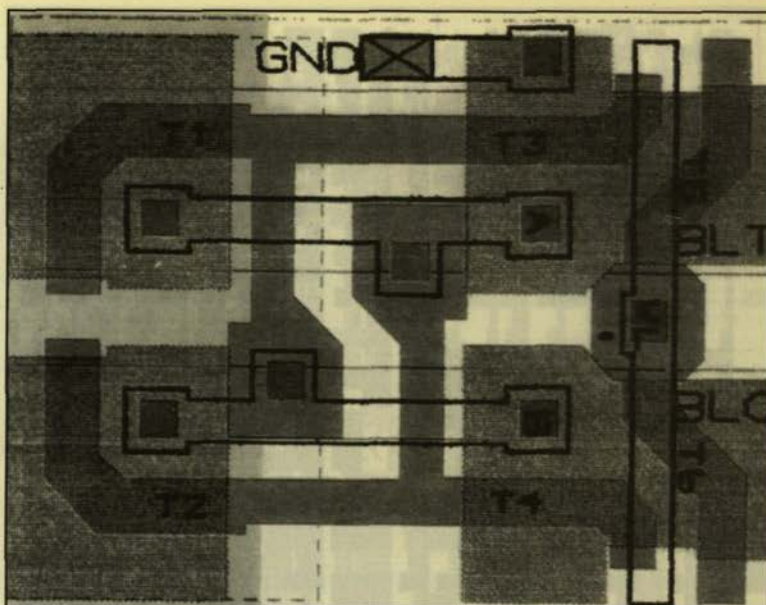
αέριο πολύ υψηλής θερμοκρασίας (γύρω στον 1150°C) για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.

Από τα μέσα της δεκαετίας του '70, η ιοντική εμφύτευση βρῖσκει συνεχώς νέες εφαρμογές στην τεχνολογία VLSI. Η ευελιξία της ιοντικής εμφύτευσης σαν εργαλείο ικανό ν' ακολουθεί τις εξελίξεις της συρρίκνωσης των ηλεκτρονικών διατάξεων, οφείλεται στις ιδιότητές της να είναι ελέγξιμη και να προσφέρει επαναλήψιμα αποτελέσματα. Η ζημιά που προκαλείται στο κρυσταλλικό πλέγμα από την εμφύτευση μπορεί να επανορθωθεί με ταχεία θερμική επεξεργασία που να εξασφαλίζει την ελάχιστη δυνατή διάχυση.

Η ιοντική εμφύτευση προσφέρει επιπλέον την δυνατότητα κατασκευής νέων διατάξεων, όπως π.χ. θαμιμένων αγωγών και Silicon on Insulator (SOI), οι οποίες θα περάσουν σύντομα σε ευρεία παραγωγή για εμπορικούς σκοπούς.

3.3. Λιθογραφία και διάβρωση (etching)

Η πιστή μεταφορά των σχεδίων στο VLSI είναι αντικείμενο εντατικής μελέτης. Προς τα τέλη της δεκαετίας του '60 η εκτύπωση πέρασε από εκτύπωση επαφής σε προβολική ολόκληρου του σχηματικού πεδίου (full field projection printing), που αναμένεται να είναι η κυρίαρχη λιθογραφική μέθοδος για αρκετά χρόνια ακόμη, εξαιτίας της σχετικής απλότητάς της, σε συνδυασμό με υψηλή απόδοση και ευκολία στην εφαρμογή. Η οριακή τιμή της διακριτικής ικανότητας όσον αφορά σχήματα που προορίζονται για την παραγωγή, είναι πρακτικά λίγο μεγαλύτερη από 0,5 μm. Για να πετύχουμε αναλυτική ικανότητα πέρα απ' το οπτικό όριο είναι αναγκαίο να καταφύγουμε σε εξωτικές τεχνικές όπως η λιθογραφία με χρήση ακτίνων X, με χρήση ιοντικής δόσης κ.α. Αφού καθοριστεί το σχήμα με μία λιθογραφική μέθοδο πάνω στο resist, αυτό το σχήμα πρέπει κατόπιν να μεταφερθεί σ' ένα στρώμα που βρίσκεται ακριβώς κάτω, ή σ' ένα υπόβαθρο, έτσι ώστε να προκύψει τελικά το πραγματικό κύκλωμα. Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια πιστή αναπαραγωγή λιθογραφικών χαρακτηριστικών μεγέθους κλασμάτων των μm, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί διάβρωση ενεργού πλάσματος (δηλ. διάβρωση με τη βοήθεια πλάσματος και ενεργών ιόντων). Τεχνικές πλάσματος χρησιμοποιούνται από τα μέσα της δεκαετίας του '70. Προκειμένου για μεγαλύτερα υπόβαθρα και καλύτερο έλεγχο των κατασκευαστικών παραμέτρων, θα α-



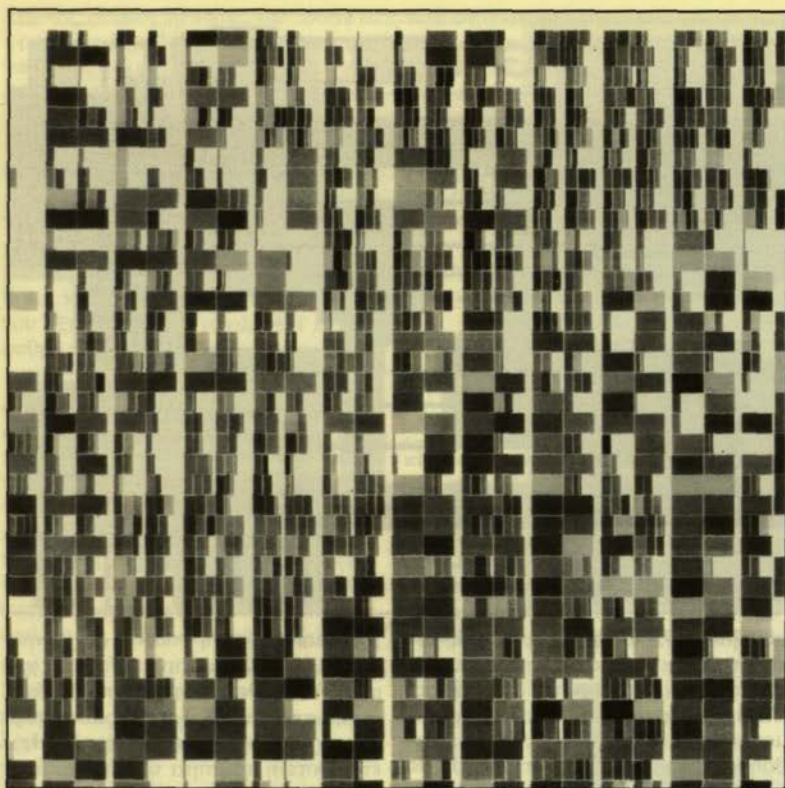
παιτηθεί θάλαμος διάβρωσης ενός μόνο υποβάθρου, με ανεξάρτητο έλεγχο του συνολικού χρόνου της διεργασίας. Τα μελλοντικά συστήματα θα χρησιμοποιούν πλάσμα μικροκυμάτων υποβοηθούμενο από σύστημα ECR (electron cyclotron resonance), ώστε να εξασφαλίζουν καλύτερο έλεγχο της ενέργειας των ιόντων, μικρότερη ζημιά από ακτινοβολία και υψηλή επιλεκτικότητα.

3.4. Εναπόθεση διηλεκτρικού στρώματος και μεταλλικών συνδέσμων.

Οι εναποθέσεις στρωμάτων χρησιμοποιούνται ευρύτατα στο VLSI. Προκειμένου να επιτευχθούν χαρακτηριστικά μήκη τάξεως κλασμάτων του μm, απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες εναπόθεσης (για ν' αποφευχθεί διάχυση των ρηχών επαφών), ομοιογενής εναπόθεση πάνω σε ανομοιογενώς διαβρωθέντα χαρακτηριστικά, και υψηλή παραγωγικότητα. Τέτοιες προδιαγραφές πληρούνται από διεργασίες εναπόθεσης σε χαμηλές πιέσεις. Η χημική εναπόθεση ατμών σε ατμοσφαιρική πίεση (APCVD - atmospheric pressure chemical vapour deposition) έχει από τα τέλη της δεκαετίας του '70 αντικατασταθεί από τη χημική εναπόθεση ατμών σε χαμηλή πίεση (LPCVD - low pressure chemical vapour deposition) και την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών υποβοηθούμενης από πλάσμα (PECVD - plasma enhanced chemical vapour deposition) για την εναπόθεση διηλεκτρικών στρωμάτων. Στο κοντινό μέλλον προβλέπεται η

χρησιμοποιούμενη τώρα συχνότητα των 13,56MHz (για την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών υποβοηθούμενης από πλάσμα) να περάσει στην περιοχή των μικροκυμάτων (> 1 GHz), έτσι ώστε η ποιότητα των στρωμάτων που εναποτίθενται να βελτιωθεί εξαιτίας, αφ' ενός μεν της μεγαλύτερης πυκνότητας των ιόντων, αφ' ετέρου δε της μικρότερης θερμοκρασίας των ηλεκτρονίων.

Το ελάχιστο χαρακτηριστικό μήκος αντιστοιχεί συνήθως στο ηλεκτρόδιο της πύλης, το οποίο απαιτεί αυστηρό έλεγχο των διαστάσεών του κατά την κατασκευή του. Κατά καιρούς έχουν επιλεγεί διάφορα υλικά για την κατασκευή των πυλών στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Στην αρχή το χρησιμοποιούμενο υλικό ήταν το αλουμίνιο. Στις αρχές της δεκαετίας του '70 αντικαταστάθηκε από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, εξαιτίας των αυτορρυθμιζόμενων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του τελευταίου, που έχουν σαν αποτέλεσμα να βελτιώνουν τη συμπεριφορά της διάταξης. Κατόπιν χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός από δύο στρώματα - silicide πάνω σε polysilicon - προκειμένου να μειωθεί η σε σειρά αντίσταση. Οι μελλοντικές εφαρμογές θα απαιτήσουν ακόμη μικρότερες αντιστάσεις σε όλα τα επίπεδα. Υλικά που υπόσχονται ταχύτερες διατάξεις και κυκλώματα είναι το silicide (αυτορρυθμιζόμενο silicide), μολυβδαίνιο ή βολφράμιο που εναποτίθενται επιλεκτικά καθώς και επιταξιακό silicide. Επί πλέον, δίκτυα πολυεπίπεδων επιμεταλλώσεων υπόσχονται να μειώσουν και την αντίστα-



ση των ενδοδιασυνδέσεων αλλά και τη συνολική επιφάνεια του τσιπ.

3.5. Εξομοίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας

Η εξομοίωση κατασκευής νέων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με τη βοήθεια υπολογιστών, έχει υιοθετηθεί ευρύτατα ως μέσο μείωσης του υψηλού κόστους καθώς και του μεγάλου συνολικού χρόνου που απαιτεί η πειραματική προσέγγιση. Προγράμματα όπως το SAMPLE ή το SUPREME είναι πολύ διαδεδομένα σε ακαδημαϊκό ή βιομηχανικό περιβάλλον. Τέτοιου είδους προγράμματα, μαζί με προγράμματα εξομοίωσης διατάξεων και κυκλωμάτων, προσφέρουν μια βολική μέθοδο προσέγγισης για τη μελέτη κατασκευαστικών διαδικασιών και διατάξεων.

Στο μέλλον τα σχεδιαστικά πακέτα θα ενσωματώνουν και τεχνητή νοημοσύνη, η οποία σε συνδυασμό με καλύτερη κατανόηση των φυσικών φαινομένων θα προσφέρει ακόμη μεγαλύτερες δυνατότητες σχεδίασης νέων διαδικασιών και νέων δρόμων διατάξεων. Τα πλήρη σχεδιαστικά συστήματα θα συνδυάζουν άμεσα δυνατότητα εξομοίωσης κατασκευαστικών βημάτων, διατάξεων και κυκλωμάτων, επιτρέποντας ταυτόχρονα τον προσδιορισμό της

ευσθησίας των παραμέτρων των διατάξεων και των κυκλωμάτων αυτών, κάνοντας δυνατή τη σχεδίαση και υλοποίηση συστημάτων με βάση κανόνες σχεδίασης που θα βρίσκονται στα πλαίσια συγκεκριμένων προδιαγραφών.

3.6. Δοκιμές και πακετάρισμα

Καθώς μεγαλώνει η πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων VLSI, αυξάνεται τόσο το κόστος των δοκιμών, όσο και της κατασκευής του περιβλήματος. Προκειμένου να διατηρηθεί χαμηλά το κόστος των δοκιμών, απαιτείται η ενσωμάτωση στο ολοκληρωμένο δυνατότητα αυτοελέγχου (self-testing capability). Για τον προσδιορισμό των αιτιών της αποτυχίας να λειτουργήσει σωστά μια διάταξη, χρησιμοποιούνται οι τεχνικές SEM (scanning electron microscopy) και TEM (transmission electron microscopy) για τον προσδιορισμό της μορφολογίας, RBS (Rutherford backscattering spectrum) για την ανάλυση της στοιχειομετρίας, και περίθλαση ακτίνων X για την ανάλυση της δομής.

Το πακετάρισμα είναι πολύ σημαντικό και στις περισσότερες περιπτώσεις καθορίζει το συνολικό κόστος, την επίδοση και την αξιοπιστία ενός προϊόντος VLSI. Η εκθετικά αυξανόμενη

πυκνότητα των στοιχείων που ενσωματώνονται ανά τσιπ απαιτεί σχεδιασμό νέων μεθόδων πακεταρίσματος. Ο αριθμός των ακροδεκτών που φέρει ένα ολοκληρωμένο συνεχίζει ν' αυξάνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του εσωτερικού του. Ο σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος εξαρτάται άμεσα από τη βελτιστοποίηση του δικτύου ενδοδιασυνδέσεων. Αυτή η βελτιστοποίηση αναμένεται να οδηγήσει σε απαιτήσεις νέων μεθόδων συναρμολόγησης και πακεταρίσματος του τσιπ.

4. Συμπεράσματα

Το VLSI απαιτεί συνεχή αναθεώρηση και βελτίωση των μεθόδων κατασκευής. Η κατασκευαστική μεθοδολογία έχει περάσει από το στάδιο της διάχυσης στο στάδιο της ιοντικής εμφύτευσης, και από το στάδιο της υγρής διάβρωσης στο στάδιο της διάβρωσης με ενεργό πλάσμα. Τα εμπορικά διαθέσιμα VLSI τσιπ περιέχουν σήμερα περισσότερα από δύο εκατομμύρια στοιχεία. Στο κοντινό μέλλον θα κατασκευαστούν τσιπ ακόμη μεγαλύτερης πολυπλοκότητας και οργάνωσης. Τέτοιες κατασκευές πρόκειται να καλύψουν την ανάγκη για χαμηλού κόστους εργαλεία που θα χειριστούν την αυξανόμενη πολυπλοκότητα της «εποχής της πληροφορικής», μιας εποχής στην οποία ένα μεγάλο μέρος του εργατικού δυναμικού μπορεί να χαρακτηριστεί ως «εργάτες της πληροφορικής»: άνθρωποι αφοσιωμένοι στην συλλογή, δημιουργία, επεξεργασία, διανομή και χρήση της πληροφορίας. Η μετάβαση του εργατικού δυναμικού των ΗΠΑ στην τελευταία κατηγορία είναι θεαματική: Πριν το 1906 το μεγαλύτερο μέρος του εργατικού δυναμικού των ΗΠΑ ήταν απασχολημένο σε αγροτικές εργασίες. Στην επόμενη περίοδο, δηλαδή μέχρι το 1950 το κύριο μέρος του δυναμικού ήταν απασχολημένο στη βιομηχανία. Αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο μέρος του δυναμικού ανήκει στους «εργάτες της πληροφορικής» (περίπου 50% των εργαζόμενων ανήκουν σ' αυτήν την κατηγορία). Σε Ευρώπη και Ιαπωνία οι εργαζόμενοι σ' αυτόν τον κλάδο φτάνουν το 40% με 45% του όλου εργατικού δυναμικού, και αναμένεται να φτάσουν το 50% πριν το τέλος του αιώνα. Η πρόοδος του VLSI αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην παγκόσμια οικονομία, μια και αποτελεί την τεχνολογία-κλειδί της οικονομίας και το δυνατότερο εργαλείο της «εποχής της πληροφορικής».