

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής



Κεφάλαιο 15°

Γ. Τσατσάρας



1

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

Διάρθρωση



VLSI Systems
and Computer Architecture Lab

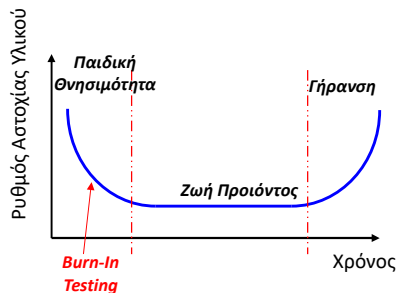
1. Ελαττώματα, σφάλματα, λάθη
2. Ανίχνευση σφαλμάτων
3. Παρατήρηση ρεύματος I_{DDQ}
4. Σειριακή σάρωση
5. Ενσωματωμένος αυτοέλεγχος
6. Εν-λειτουργία έλεγχος
7. Περιφερειακή σάρωση

Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

2

2

Η Ανάγκη Ελέγχου Ορθής Λειτουργίας



- Η διαδικασία κατασκευής παρουσιάζει ατέλειες και οδηγεί σε κατασκευαστικά ελαττώματα.

$$Y = \frac{\text{\#καλών_OK_στο_δισκίο}}{\text{\#συνολικών_OK_στο_δισκίο}}$$

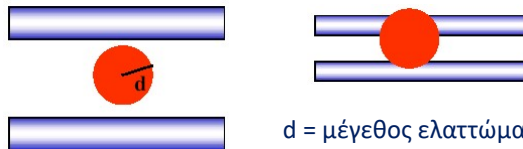
- Η απόδοση (yield - Y) εξαρτάται από την τεχνολογία, την επιφάνεια του ολοκληρωμένου και το φυσικό σχεδιασμό του (layout).
- Στα πρώτα στάδια μιας τεχνολογίας η απόδοση ξεκινά από τιμές έως και 10% για να φτάσει σε μια ώριμη τεχνολογία μέχρι και 95%.

Κανόνας: Όσο νωρίτερα ανιχνευθεί ένα ελάττωμα τόσο μικρότερο το κόστος αντιμετώπισής του.



Αιτίες Κατασκευαστικών Ελαττωμάτων

- Υπολείμματα (ακαθαρσίες) που εναπομένουν στο ολοκληρωμένο κύκλωμα (OK) κατά τη διαδικασία κατασκευής και η επικάλυψη εξωγενών σωμάτων σε αυτό.
- Τυχαία διακύμανση των κατασκευαστικών παραμέτρων.



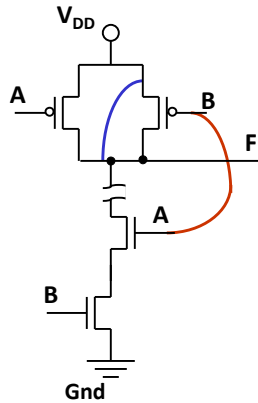
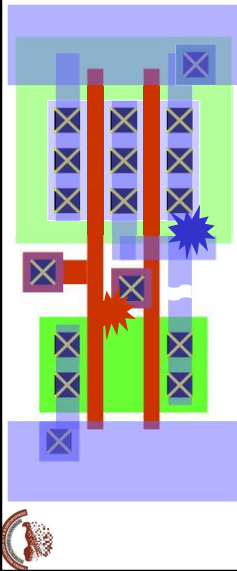
d = μέγεθος ελαττώματος

Ορισμοί:

- **Ελαττώματα (Defects)** είναι οι κατασκευαστικές ατέλειες (failures) και οι μόνιμες βλάβες ενός OK κατά τη διαδικασία κατασκευής.
- **Σφάλματα (Faults)** είναι οι μοντελοποιήσεις της επίδρασης των ελαττωμάτων στη συμπεριφορά των OK.
- **Λάθη (Errors)** είναι η λανθασμένες λογικές αποκρίσεις των OK υπό την παρουσία σφαλμάτων.



Μοντέλα Σφαλμάτων



- **Σφάλμα Μόνιμης Τιμής (Stuck-At Fault):** ένας κόμβος του κυκλώματος εμφανίζει μόνιμα την ίδια λογική τιμή.
- **Σφάλμα Μόνιμα Αγωγίμου Τρανζίστορ (Transistor Stuck-Open):** ένα τρανζίστορ είναι μόνιμα σε αγωγή κατάσταση.
- **Σφάλμα Μόνιμα μη Αγωγίμου Τρανζίστορ (Transistor Stuck-Closed):** ένα τρανζίστορ είναι μόνιμα σε μη αγωγή κατάσταση.
- **Σφάλμα Βραχυκύκλωσης (Bridging Fault):** βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο κόμβων.
- **Σφάλμα Καθυστερήσης Διάδοσης Σήματος (Delay Fault).**

Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

5

5

Ανίχνευση Σφαλμάτων

Πως είναι δυνατή η ανίχνευση της πιθανής ύπαρξης σφαλμάτων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο ενδέχεται να αποτελείται μέχρι και πάνω από ένα δισεκατομμύριο τρανζίστορ;

- ✗ Εφαρμογή όλων των δυνατών συνδυασμών τιμών στις εισόδους και εξέταση των αποκρίσεων.

Ανέφικτη στρατηγική εξ' αιτίας του τρομακτικά μεγάλου αριθμού των δυνατών συνδυασμών.

- ✓ Χρήση αλγορίθμων για την εξαγωγή ενός περιορισμένου συνόλου συνδυασμών στις εισόδους του κυκλώματος (διανύσματα) και των αποκρίσεων τους ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση "όλων" των σφαλμάτων του μοντέλου σφαλμάτων που μας ενδιαφέρει.

Κύρια στρατηγική: "διαίρει και βασίλευε"

Κάλυψη Σφαλμάτων (Fault Coverage):

$$FC = \frac{\# \text{ανιχνευόμενων_σφαλμάτων}}{\# \text{συνολικών_σφαλμάτων}}$$

Ζητούμενη Κάλυψη Σφαλμάτων 100%. Στην πράξη μεταξύ 90-99% ανάλογα με το μοντέλο σφαλμάτων.



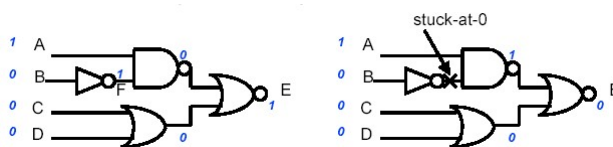
Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

6

6

Ικανότητα Ανίχνευσης Σφαλμάτων

- **Ελεξιμότητα (Controllability):** η ικανότητα να τεθεί ένας κόμβος σε μια δεδομένη κατάσταση (0 ή 1) με κατάλληλες τιμές στις εισόδους του ΟΚ.
- **Παρατηρησιμότητα (Observability):** η ικανότητα να διαπιστωθεί η τιμή ενός κόμβου από τις αποκρίσεις στις εξόδους του ΟΚ.



Ελεύθερο από σφάλματα κύκλωμα

Υπαρξη σφάλματος μόνιμης τιμής

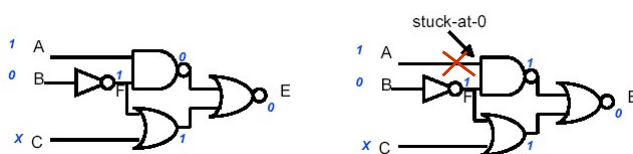
Η διαδικασία της ανίχνευσης σφαλμάτων μπορεί να ιδωθεί ως η ενέργεια εκείνη με την οποία θα *ενεργοποιήσουμε* (*sensitise*) ένα σφάλμα από το εξωτερικό περιβάλλον (κύριες εισοδοί), ώστε αυτό να οδηγήσει στην εμφάνιση μιας λανθασμένης τιμής σε ένα κόμβο του κυκλώματος, και εν συνεχεία να *διαδώσουμε* (*propagate*) την λανθασμένη τιμή σε κάποια κύρια έξοδο για να την παρατηρήσουμε από το εξωτερικό περιβάλλον.



Προβλήματα: Σημεία Επανασύγκλισης

Η ύπαρξη *σημείων επανασύγκλισης σημάτων* (*reconvergent fan-out points*) δυσκολεύει σημαντικά την ανίχνευση σφαλμάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι δεν μπορούμε να θέσουμε σε δύο κόμβους τις επιθυμητές τιμές ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Στο παράδειγμα, δεν υπάρχει τιμή για τον κόμβο B που να επιτρέπει ταυτόχρονα την ενεργοποίηση του σφάλματος και την διάδοσή του στην έξοδο. Το σημείο επανασύγκλισης είναι ο κόμβος E.

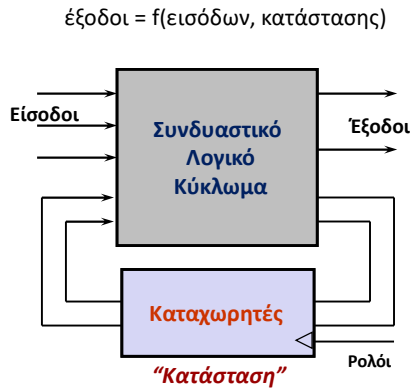


Ελεύθερο από σφάλματα κύκλωμα

Υπαρξη σφάλματος μόνιμης τιμής



Προβλήματα: Ακολουθιακά Κυκλώματα



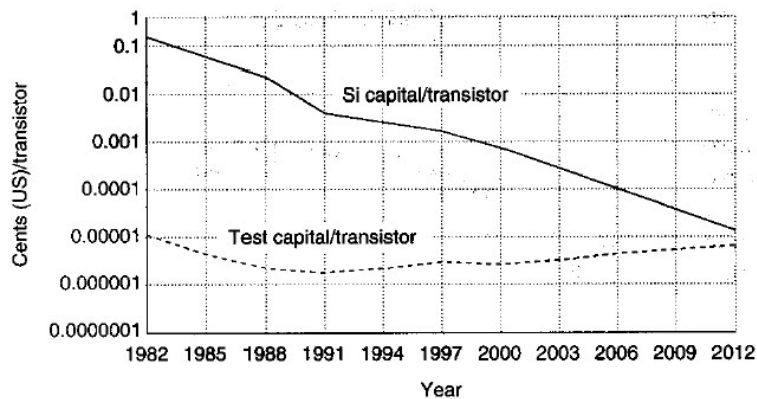
Στα ακολουθιακά κυκλώματα η εσωτερική αρχική κατάσταση του κυκλώματος (τιμές καταχωρητών) είναι συνήθως άγνωστη. Συνεπώς η ενεργοποίηση πιθανών σφαλμάτων και η διάδοση των λανθασμένων αποκρίσεων αποτελεί μια σημαντικά πιο δύσκολη διαδικασία.

Η λύση είναι η χρήση τεχνικών αρχικοποίησης της εσωτερικής κατάστασης.

- Ακολουθίες διανυσμάτων – Χρήση σημάτων Reset.
- Τεχνικές επιβολής αρχικών καταστάσεων από το εξωτερικό περιβάλλον και παρατήρησης των καταστάσεων που οδηγείται το κύκλωμα.



Το Κόστος του Ελέγχου Ορθής Λειτουργίας



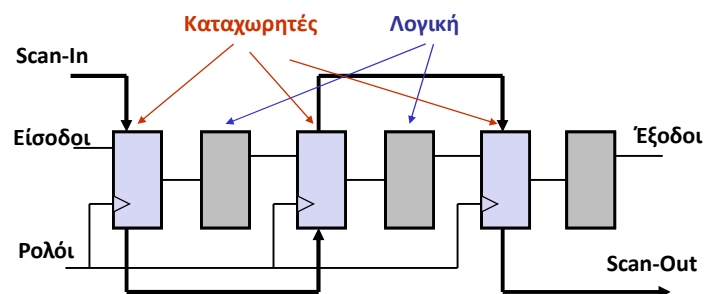
Σχεδιαστικές Τεχνικές Ελέγχου

Ο σχεδιασμός για την αύξηση της ικανότητας ελέγχου ορθής λειτουργίας (design for testability - DFT) αποτελεί την αδιαμφισβήτητη τεχνική επίτευξης του ελέγχου της ορθής λειτουργίας στα σύγχρονα ΟΚ.

- Χρήση τεχνικών **σειριακής σάρωσης (scan techniques)**.
Επιτρέπουν την πρόσβαση στις εσωτερικές καταστάσεις του ΟΚ.
- Τεχνικές **ενσωματωμένου αυτοελέγχου (built-in self test - BIST)**.
*Ενσωμάτωση στο ΟΚ τεχνικών και κυκλωμάτων που θα επιτρέψουν τον αυτοέλεγχό του. Τα κυκλώματα αυτά παρέχουν διανύσματα εισόδου στο κυρίως κύκλωμα και/ή παρατηρούν τις εξόδους για την ανίχνευση λαθών.
Ενδέχεται να παρέχουν κάλυψη σφαλμάτων και κατά τη λειτουργία του κυκλώματος (on-line testing).*
- Τεχνικές **περιφερειακής σάρωσης (boundary scan)**.
Πρόκειται για τεχνικές σε επίπεδο ΟΚ που επιτρέπουν με τη χρήση ενός μικρού αριθμού από εξειδικευμένους ακροδέκτες σημάτων να πραγματοποιηθεί γρήγορα και πρακτικά ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας (π.χ. πρωτοκολλά IEEE 1149.1 και IEEE 1500).



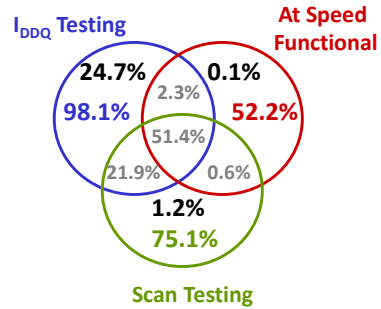
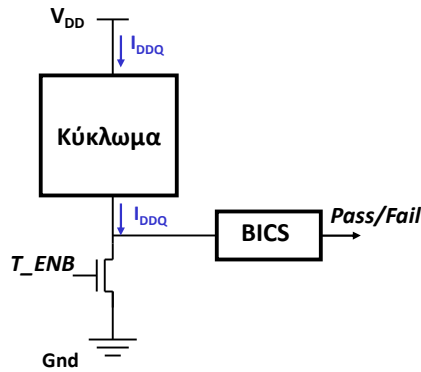
Σειριακή Σάρωση



Ενοποίηση των καταχωρητών του κυκλώματος σε έναν ενιαίο ολισθητή καταχωρητή γνωστό ως καταχωρητής σάρωσης (scan register). Κατά αυτόν τον τρόπο η εσωτερική κατάσταση του κυκλώματος μπορεί να καθορίζεται εισάγοντας σειριακά δεδομένα στον καταχωρητή σάρωσης. Επιπλέον οποιαδήποτε εσωτερική κατάσταση μπορεί να παρατηρηθεί από το εξωτερικό περιβάλλον εξάγοντας σειριακά τα δεδομένα του καταχωρητή σάρωσης.



Παρατήρηση Ρεύματος I_{DDQ}



Το ρεύμα ηρεμίας I_{DDQ} ενός ψηφιακού CMOS κυκλώματος αναμένεται να είναι πολύ μικρό και ίσο με τις αθροιστικές διαρροές ρεύματος σε αυτό. Η ανίχνευση ενός πολύ μεγαλύτερου ρεύματος από το αναμενόμενο μπορεί να αποτελέσει ένδειξη ελαττωματικής λειτουργίας.

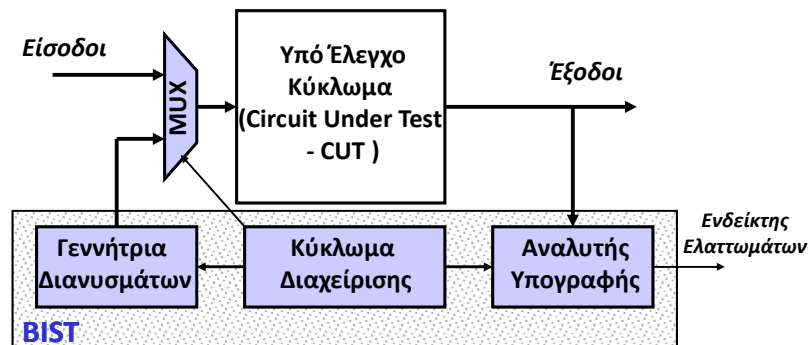
IBM Data

Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

13

13

Ενσωματωμένος Αυτοέλεγχος



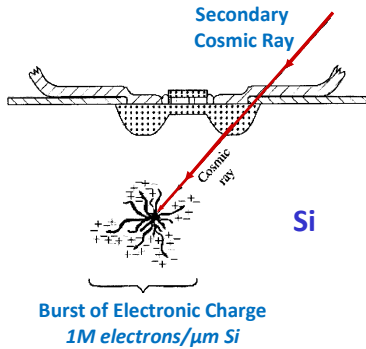
Στον ενσωματωμένο αυτοέλεγχο τα διανύσματα ελέγχου δημιουργούνται εσωτερικά στο OK και εφαρμόζονται κάτω από τον έλεγχο ενός κυκλώματος διαχείρισης (BIST controller). Οι αποκρίσεις του κυκλώματος συμπιέζονται από τον αναλυτή υπογραφής και το τελικό αποτέλεσμα μετά το πέρας του ελέγχου της ορθής λειτουργίας συγκρίνεται με το αναμενόμενο έτσι ώστε το κύκλωμα διαχείρισης να επισημάνει με κατάλληλο σήμα στο εξωτερικό περιβάλλον την πιθανή ύπαρξη σφαλμάτων στο OK.

Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

14

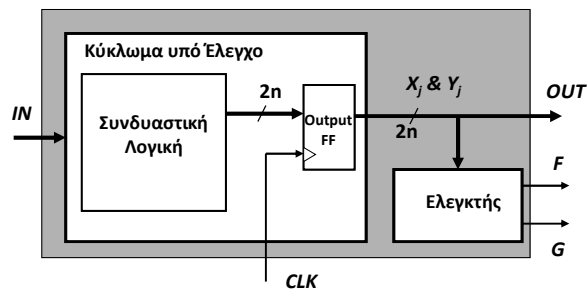
14

Εν Λειτουργία Έλεγχος



Ύπαρξη μεταβατικών σφαλμάτων τα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν σε λάθος αποκρίσεις.

Ανάγκη ύπαρξης μηχανισμών ανίχνευσης λαθών εν λειτουργία!

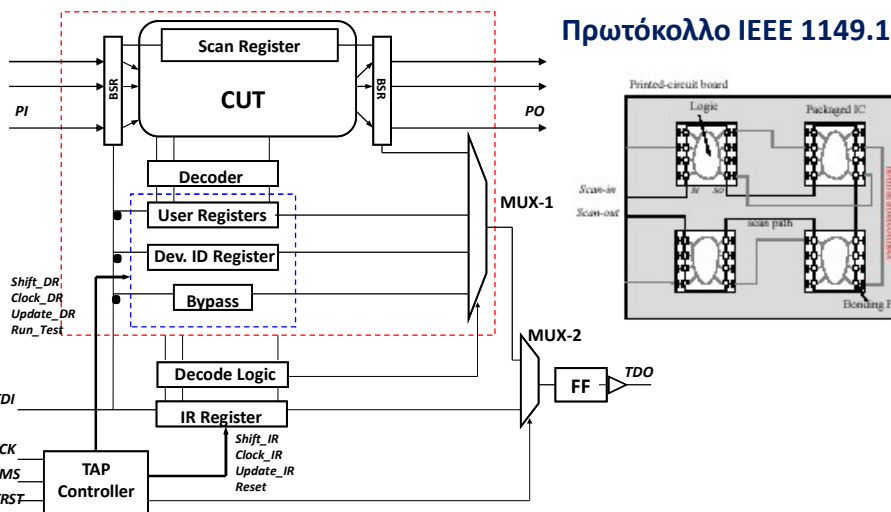


Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

15

15

Περιφερειακή Σάρωση



Έλεγχος Ορθής Λειτουργίας

16

16

Η Πρόκληση των SoC Εφαρμογών

