



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Θερμική Ανάλυση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Φοιτήτρια:

Γρηγοριάδου Κλειώ

Επιβλέποντες:

Σταμούλης Γεώργιος, Καθηγητής

Ευμορφόπουλος Νέστωρ, Επίκουρος Καθηγητής

Βόλος, Φεβρουάριος 2016

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου στην εργασία αυτή, τον κ. Σταμούλη Γεώργιο και τον κ. Ευμορφόπουλο Νέστωρ. Ήταν πάντοτε διαθέσιμοι, με βοήθησαν και με καθοδήγησαν καθ' όλη την διάρκεια της δουλειάς μου και η κατανόηση που έδειξαν ήταν παραπάνω από αρκετή.

Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματός μας Γεώργιο Φλώρο, τόσο για την προσφορά όλου του υλικού που χρειάστηκα όσο και για την αμέριστη βοήθειά του.

Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε, με κατανόησε και με επικροτούσε σε κάθε μου προσπάθεια, καθώς και όλους τους φίλους μου που έκαναν την εργασία να φαίνεται πιο εύκολη. Θα ήθελα να αφιερώσω ολοκληρωτικά αυτή την διπλωματική στην αδερφή μου.

Περίληψη

Η θερμική ανάλυση είναι ένα μείζον ζήτημα που απασχολεί κάθε τεχνολογική εξέλιξη. Η μεγαλύτερη απόδοση σε συνδυασμό με μικρότερα μεγέθη είναι οι στόχοι κάθε προσπάθειας. Η σημερινή δομή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι τρισδιάστατη και γίνεται χρήση των low-k διηλεκτρικών, γεγονότα που προκαλούν ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι έρχονται στην επιφάνεια κίνδυνοι και προκλήσεις, που σημαίνει ότι το ζήτημα της θερμικής ανάλυσης απαιτεί προσοχή και μελέτη.

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε πειραματικός έλεγχος των αποτελεσμάτων μιας λύσης του θερμικού προβλήματος. Με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών έχουμε ένα αρχείο matlab το οποίο παράγει αποτελέσματα χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τις πραγματικές τιμές του κυκλώματος. Συλλέγοντας τα στοιχεία που χρειαζόμαστε από τα αρχεία LEF/DEF προσομοιώσαμε το αρχείο s27.def και συγκρίναμε τα αποτελέσματα.

Abstract

Thermal analysis is a major issue that concerns every technological progress. Better performance combined with smaller sizes is the goal of every effort. The current structure of integrated circuits is three-dimensional and made use of low-k dielectrics, facts that cause even more temperature rises. Risks and challenges come to the surface, which means that the problem of thermal analysis requires attention and study.

In this thesis we conducted experimental verification of the results for a solution of the thermal problem. With the finite difference method we have a matlab file which produces results without considering the actual circuit values. Collecting the data we need from the LEF / DEF files we simulated the s27.def file and compared the results.

Περιεχόμενα

1	Κεφάλαιο – Θερμικές Επιδράσεις.....	6
1.1	Παραγωγή θερμότητας λόγω τεχνολογικής εξέλιξης	6
1.2	Θερμικά Ζητήματα.....	7
1.2.1	Απόδοση	8
1.2.2	Κατανάλωση Ισχύος	8
1.2.3	Φαινόμενο Joule Heating.....	8
1.2.4	Αξιοπιστία.....	9
1.2.5	Πτώση IR	10
2	Κεφάλαιο – Αλγόριθμος Λύσης Προβλήματος	11
2.1	Μοντελοποίηση Προβλήματος	11
2.2	Προτιμώμενος Αλγόριθμος.....	11
2.3	Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών	12
3	Κεφάλαιο – Προσομοίωση Κυκλώματος	15
3.1	Επισκόπηση.....	15
3.2	Πληροφορίες για το κύκλωμα.....	15
3.2.1	Αρχείο def.....	15
3.2.2	Αρχείο LEF.....	16
3.3	Τροποποίηση Κώδικα	16
3.4	Αποτελέσματα	17
3.5	Μελλοντικοί Στόχοι	20
4	Βιβλιογραφία	21

1 Κεφάλαιο – Θερμικές Επιδράσεις

1.1 Παραγωγή θερμότητας λόγω τεχνολογικής εξέλιξης

Από την εμφάνιση των πρώτων τεχνολογικών επιτευγμάτων, η ταχύτητα και η απόδοση υπήρξαν οι κύριοι στόχοι που εμπνέουν τους εφευρέτες ώστε να εξελίξουν τα μέχρι τώρα επιτεύγματά τους. Συγκεκριμένα, στη βιομηχανία των ημιαγωγών, υπάρχει μία αδιάκοπη προσπάθεια για όλο και υψηλότερες αποδόσεις και ταχύτητες στα CMOS, γεγονός που προκλήθηκε από τις αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών και τον ανταγωνισμό μεταξύ των κατασκευαστών. Αναμφίβολα, η βιομηχανία της ηλεκτρονικής διαδραματίζει ηγετικό ρόλο στην οικονομική, πολιτική και κοινωνική ανάπτυξη ανά τον κόσμο.

Άμεση συνέπεια των ανωτέρω είναι η διαβάθμιση των CMOS, έτσι καθ' όλη την διάρκεια των ετών έχει παρατηρηθεί μεγάλη ελάττωση του μεγέθους των συσκευών. Ωστόσο, παρόλο που το σύνθημα «Μικρότερο και Γρηγορότερο» αποτελεί την κινητήρια δύναμη, πρέπει να αναλογιστούμε τις προκλήσεις αλλά και τους κινδύνους που βγαίνουν στην επιφάνεια.

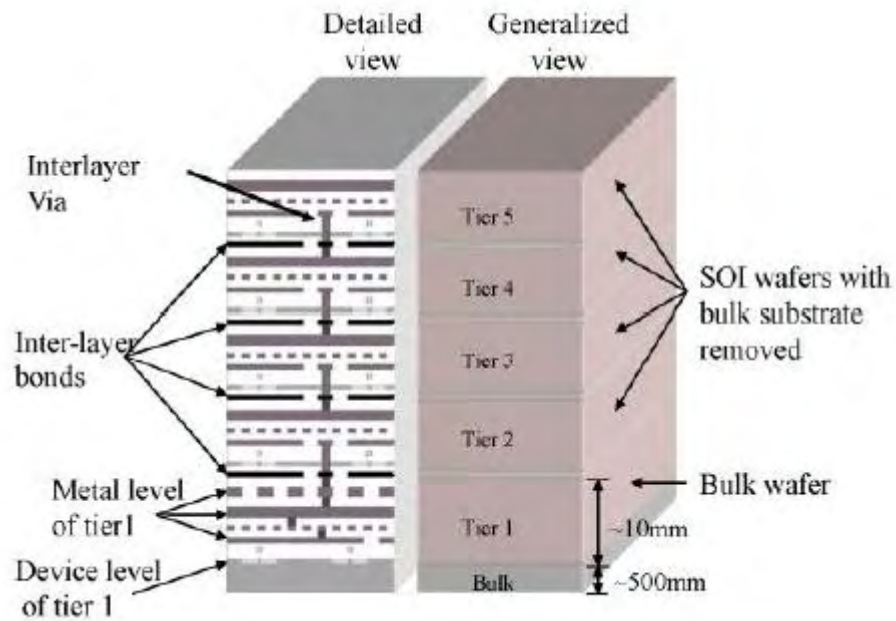
Ένα σημαντικό θέμα που συνοδεύει την είσοδο σε μεγέθη νανομέτρων, είναι η αυξημένη πυκνότητα ισχύος. Πρόκειται για έναν παράγοντα που οδηγεί σε αυξανόμενη θερμοκρασία στο τσιπ, θέτει σε κίνδυνο την απόδοση και απειλεί την εύρυθμη λειτουργία των συσκευών. Εκτός από αυτό, καθώς τα τσιπ δε θερμαίνονται με ομοιόμορφο τρόπο, δημιουργούνται hot spots και χωρικές διαβαθμίσεις, με υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος και κατά συνέπεια υψηλότερες τοπικές θερμοκρασίες.

Η θερμική απειλή μεγαλώνει επίσης λόγω της σημερινής πολυστρωματικής 3D δομής και της χρήσης των low-k διηλεκτρικών. Το στοίβαγμα σε έναν 3D όγκο υπόσχεται πυκνότητα και απόδοση. Ωστόσο, απαιτείται εκτεταμένη θερμική μελέτη καθώς η πυκνότητα ισχύος και η θερμοκρασία σε τέτοιου είδους αρχιτεκτονικές μπορεί να είναι αρκετά υψηλές. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται να ψύξουμε έναν όγκο ο οποίος αποτελείται από στρώματα τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο και όχι μόνο μια επίπεδη επιφάνεια. Πέραν τούτου, έχουν εισαχθεί υλικά όπως τα low-k διηλεκτρικά προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση, μειώνοντας την χωρητικότητα των διασυνδέσεων και καθυστερώντας τον πολλαπλό θόρυβο επικοινωνίας. Το πρόβλημα όμως δεν σταματά εδώ καθώς τα υλικά αυτά είναι αρκετά ευαίσθητα λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς τους.

Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μία αναπόφευκτη πτυχή της συνεχούς εξέλιξης των διαβαθμίσεων. Παρόλα αυτά η υψηλή θερμοκρασία έχει μεγάλες επιπτώσεις στην απόδοση και την αξιοπιστία ενός τσιπ. Οδηγούμεστε δηλαδή σε χαμηλότερη ταχύτητα τρανζίστορ, μεγαλύτερη διαρροή της κατανάλωσης ρεύματος, αυξημένη αντίσταση διασυνδέσεων και μειωμένη αξιοπιστία,

δημιουργώντας ένα σύνολο από θερμικά ζητήματα τα οποία αποτελούν μείζονα πρόκληση και πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν. Η διαχείρισή τους αποτελεί κύριο παράγοντα για τους μελλοντικούς μικροεπεξεργαστές και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Απόδειξη της σημασίας τους είναι η ήδη υπάρχουσα εκτεταμένη έρευνα πάνω στα μοντέλα θερμικής ανάλυσης, ενώ πολλά ερευνητικά εργαστήρια προσπαθούν να παρουσιάσουν πιο ακριβείς θερμικούς προσομοιωτές.

Στην Εικόνα 1, μπορούμε να δούμε την δομή των 3D ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Εικόνα 1: 3D δομή ολοκληρωμένου κυκλώματος

1.2 Θερμικά Ζητήματα

Όπως προαναφέραμε τα θερμικά ζητήματα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα επηρεάζουν σε κρίσιμο βαθμό την απόδοση και την αξιοπιστία. Επομένως, είναι απαραίτητο να ρίξουμε μια πιο προσεκτική ματιά στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται.

1.2.1 Απόδοση

Ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μία εργασία, η οποία χρησιμοποιεί καθορισμένη ποσότητα ενός πόρου, ορίζεται ως η απόδοση του υπολογιστή. Σε ένα τσιπ η απόδοση σχετίζεται άμεσα με την συχνότητα του ρολογιού και, κατά συνέπεια, με την καθυστέρηση του κυκλώματος.

Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας φέρνουν στην επιφάνεια δύο συγκρουόμενες προκλήσεις. Από την μία πλευρά, η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να προκαλέσει μείωση της κινητικότητας του φορέα του φορτίου και τελικά αύξηση των καθυστερήσεων. Από την άλλη όμως μπορεί να προκαλέσει μείωση της τάσης κατωφλίου, το οποίο σημαίνει αυξημένο ρεύμα κίνησης και τελικά μείωση των καθυστερήσεων του κυκλώματος.

Σύμφωνα με τις επικρατούσες επιδράσεις θα υπάρξει θετική εξάρτηση από την θερμοκρασία (μείωση καθυστερήσεων), αρνητική εξάρτηση (αύξηση καθυστερήσεων) ή μικτή εξάρτηση.

1.2.2 Κατανάλωση Ισχύος

Οι πηγές κατανάλωσης ισχύος στα VLSI κυκλώματα προέρχονται από τις διατάξεις και τις διασυνδέσεις. Η κατανάλωση ισχύος μπορεί να αναλυθεί σε δυναμική ισχύ, ισχύ βραχυκυκλώσεως και στατική ισχύ. Στις διασυνδέσεις η κατανάλωση αυτή προέρχεται από το φαινόμενο Joule.

Η δυναμική ισχύς προκαλείται από τις φορτίσεις και αποφορτίσεις κατά την διάρκεια των εναλλαγών τάσης και έχει αμελητέα εξάρτηση από την θερμοκρασία. Η ισχύς βραχυκυκλώσεως προκαλείται από το ρεύμα λόγω της γείωσης και επίσης έχει αμελητέα εξάρτηση.

Η στατική ισχύς ωστόσο, φαίνεται να οφείλεται σε διαρροές και έχει εκθετική εξάρτηση από την θερμοκρασία. Έτσι, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιγράφονται ακριβώς από τις διαρροές, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις κατέχουν ηγετική θέση επί της συνολικής ισχύος του τσιπ.

1.2.3 Φαινόμενο Joule Heating

Η κατανάλωση ισχύος μπορεί να προέρχεται όχι μόνο από την στατική, δυναμική ή ισχύ βραχυκυκλώσεως αλλά και από το φαινόμενο Joule Heating. Το φαινόμενο Joule Heating είναι η διαδικασία κατά την οποία η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από έναν αγωγό απελευθερώνει θερμότητα. Ως εκ τούτου η ροή του ρεύματος μέσω μεταλλικών καλωδίων καταναλώνει

ισχύ και παράγει θερμότητα, αυξάνοντας την θερμοκρασία τους. Σύμφωνα με το 3D μοντέλο, οι διασυνδέσεις βρίσκονται μακριά από το υπόστρωμα πυριτίου και του απαγωγέα θερμότητας και χωρίζονται από στρώματα μονωτικών υλικών με μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από αυτήν του πυριτίου. Τα low-k διηλεκτρικά μειώνουν την αγωγιμότητα των υλικών, επιβαρύνοντας το φαινόμενο αυτό. Καθώς η ειδική αντίσταση του καλωδίου εξαρτάται από την θερμοκρασία: $\rho(T) = \rho_0[1 + b(T - T_0)]$, υψηλότερες πυκνότητες οδηγούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερες καθυστερήσεις.

Κατά συνέπεια, οι διαβαθμίσεις αυξάνουν την πυκνότητα του ρεύματος και το φαινόμενο Joule Heating γίνεται σημαντικός παράγοντας στη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας της συσκευής, απειλώντας την αξιοπιστία και την απόδοσή της.

1.2.4 Αξιοπιστία

Η ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί την καλή λειτουργία του, ακόμη και κάτω από απρόσμενες συνθήκες, κατά τη διάρκεια της ζωής του ονομάζεται αξιοπιστία. Όσον αφορά τους ημιαγωγούς, ο όρος αξιοπιστία αφορά την πρόωρη γήρανση των υλικών και τις συνέπειες που αυτό επιφέρει στην λειτουργία της συσκευής. Τα πιο σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με τη θερμοκρασία και επηρεάζουν την αξιοπιστία είναι: η *Αστάθεια της Θερμοκρασίας Bias* και η *Ηλεκτρο-μετανάστευση*.

Αστάθεια της Θερμοκρασίας Bias

Πρόκειται για ένα σύνθετο ηλεκτροθερμικό φαινόμενο που εμφανίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες και προκαλεί μεταβολές της τάσης κατωφλίου για μεγάλες χρονικές περιόδους. Διακρίνεται σε NBTI που αφορά τα pMOS και PBTI που αφορά τα nMOS. Η NBTI (negative bias temperature instability) προκαλείται από την δημιουργία παγίδων διεπαφής, οι οποίες είναι ακόρεστοι δεσμοί πυριτίου. Με τη θερμοκρασία να αυξάνεται η παραγωγή αυτών των παγίδων επιταχύνεται, ενώ οι συνολικές παγιδευμένες οπές αυξάνουν την τάση κατωφλίου και μειώνουν την κατανάλωση ρεύματος.

Μία διττή επίδραση είναι η PBTI (positive bias temperature instability) με λιγότερες επιπτώσεις από την NBTI αλλά αρκετά σημαντικές.

Ηλεκτρο-μετανάστευση

Η ηλεκτρο-μετανάστευση αναφέρεται στην μετανάστευση ατόμων μετάλλου συναρτήσει του χρόνου, σε περιοχές όπου υπάρχει υψηλή

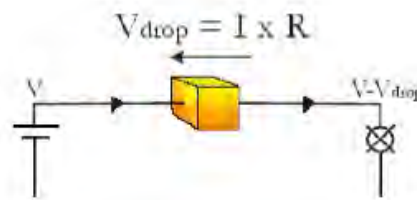
πυκνότητα ρεύματος, σχηματίζοντας έτσι κενά στο καλώδιο. Η εξίσωση του Black περιγράφει την το φαινόμενο αυτό με τον ακόλουθο τρόπο:

$$MTTF = AJ^{-n}e^{Q/kT},$$

όπου ο ρόλος της θερμοκρασίας είναι ότι η αύξησή της μειώνει το MTTF και ως εκ τούτου μειώνει τη διάρκεια ζωής του τσιπ. Η θερμότητα λόγω των διατάξεων, αλλά και η θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule επηρεάζουν την θερμοκρασία του καλωδίου.

1.2.5 Πτώση IR

Το πρόβλημα της πτώσης IR εμφανίζεται λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης ενός αγωγού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, δημιουργείται μία τάση $V_{drop} = R * I$ μεταξύ των δύο άκρων του αγωγού. Κατά συνέπεια, υπάρχει πτώση τάσης στις διατάξεις φορτίου, όπου $V_{load} = V_{supply} - V_{drop}$.



Εικόνα 2: Το φαινόμενο της πτώσης IR

Λόγω του φαινομένου Joule Heating, η ροή του ρεύματος μέσα από τα μεταλλικά καλώδια αυξάνει τη θερμοκρασία τους, ενώ η ηλεκτρική αντίσταση είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, η αύξηση της δεύτερης αυξάνει και την αντίσταση. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο V_{drop} και τελικά σε μικρότερο V_{load} .

2 Κεφάλαιο – Αλγόριθμος Λύσης Προβλήματος

2.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος

Οι παραδοσιακές μέθοδοι θερμικής ανάλυσης χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους επίλυσης, όπως των πεπερασμένων διαφορών (ΜΠΔ), των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), των εξισώσεων Green. Οι υπολογισμοί είναι εντατικοί, ειδικά για μεγάλης κλίμακας 3D ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και απαιτούν τη λύση γραμμικών εξισώσεων που δίνονται από το αντίστοιχο θερμικό κύκλωμα. Επανεξετάζοντας τη λύση του θερμικού προβλήματος, προϋποθέσεις είναι η ικανότητα για μοντελοποίηση των μονοπατιών μεταφοράς θερμότητας του τσιπ με περιβαλλοντικά και η ανάλυση του συνολικού θερμικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων που δεν υπάρχουν εντελώς «πάνω στο τσιπ».

Η ροή της θερμότητας μπορεί να μοντελοποιηθεί σε σταθερή κατάσταση. Η θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης είναι παρόμοια με τη λύση απλών κυκλωμάτων με αντιστάσεις εν σειρά και υπάρχει ισοδυναμία μεταξύ των ηλεκτρικών και θερμικών ποσοτήτων. Το ηλεκτρικό ρεύμα μοντελοποιείται ως ροή θερμότητας σε Watts, η αντίσταση ως θερμική αντίσταση σε °C/W, η τάση κόμβου ως θερμοκρασία πλέγματος σε °C, ο βρόγχος ρεύματος ως θερμικός βρόγχος και το δυναμικό γείωσης ως η θερμοκρασία του αέρα στο περιβάλλον.

Η θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης στοχεύει στον προσδιορισμό της κατανομής της ενέργειας, όπου το τσιπ έχει τέτοια διανομή της πυκνότητας της ενέργειας που είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο. Έτσι η ανάλυση αυτή προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης του Poisson: $q(r) = k_t \cdot \nabla T$, όπου r η χωρική συντεταγμένη στο σημείο όπου ορίζεται η θερμοκρασία, $q(r)$ η ροή της θερμότητας, k_t η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και T η θερμοκρασία.

2.2 Προτιμώμενος Αλγόριθμος

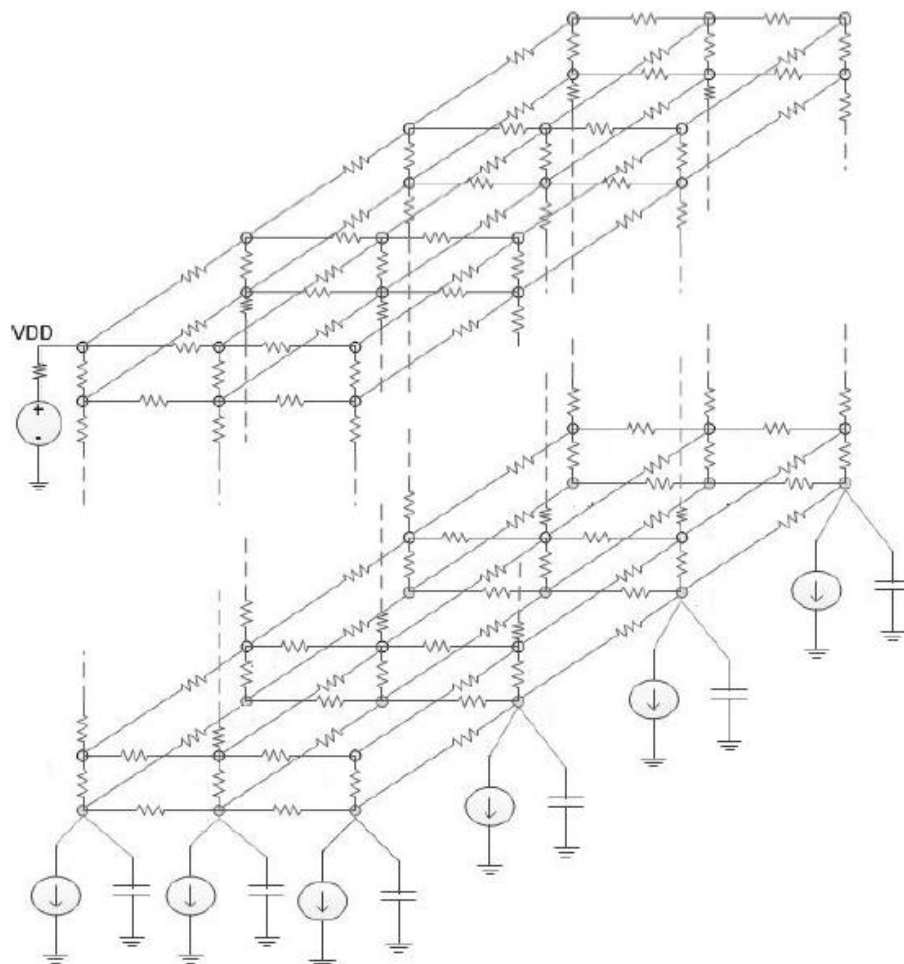
Σε μία προσπάθεια να συγκρίνουμε τις μεθόδους θερμικής προσομοίωσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι ΜΠΔ και ΜΠΣ διακριτοποιούν ολόκληρο το τσιπ και υπόσχονται μεγάλη ακρίβεια. Ο χειρισμός πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων όπως οι μη ομοιόμορφες δομές γίνεται πολύ ευέλικτος. Η βασική διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η ΜΠΔ διακριτοποιεί τον διαφορικό φορέα ενώ η ΜΠΣ διακριτοποιεί το πεδίο της θερμοκρασίας.

Από την άλλη πλευρά οι εξισώσεις του Green αναλύουν μόνο τα στρώματα των οποίων η θερμοκρασία μας ενδιαφέρει. Κατά συνέπεια το μέγεθος του

προβλήματος που προκύπτει είναι σχετικά μικρό και μπορεί να επιλυθεί πολύ γρήγορα. Το κύριο πρόβλημα όμως είναι ότι η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ομοιόμορφες κατανομές.

Τελικά, η μέθοδος που φαίνεται να είναι προτιμώτερη είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Σε συνδυασμό με τις μαζικά παράλληλες αρχιτεκτονικές (όπως οι GPUs) μπορούμε να πετύχουμε ένα ακριβές μοντέλο θερμικής ανάλυσης με σχεδόν βέλτιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα και μικρές απαιτήσεις σε μνήμη.

2.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών



Εικόνα 3: Μοντελοποίηση του τσιπ σαν πλέγμα αντιστάσεων

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method – FDM) διακριτοποιεί όλο το τσιπ σχηματίζοντας ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που συνδέουν την κατανομή της θερμοκρασίας με την κατανομή της πυκνότητας ισχύος. Η βασική φιλοσοφία πίσω από την ΜΠΔ, είναι η μετατροπή των κύριων εξισώσεων, από συνεχείς συναρτήσεις στα αντίστοιχα διακριτά δείγματα, δημιουργώντας ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων επιλύσιμο για εξαρτημένες μεταβλητές σε διακριτά σημεία του πλέγματος. Έτσι το τσιπ μπορεί να διακριτοποιηθεί σε κυβοειδής περιοχές, με τις πλευρές τους να εκτείνονται κατά μήκος των αξόνων x , y , z . Με αυτόν τον τρόπο, η χωρική παράγωγος της θερμοκρασίας T μπορεί να γραφεί ως μία διαφορά σε ορθογώνιες συντεταγμένες. Αν υποθέσουμε μία περιοχή όπου η κορυφή είναι η αρχή των αξόνων της πρώτης οκτάδας και $T_{i,j,k}$ η θερμοκρασία του κόμβου ($i\Delta_x, j\Delta_y, k\Delta_z$), τότε στον άξονα x έχουμε:

$$\frac{\partial^2 T(r)}{\partial^2 x} \cong \frac{\frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}}{\Delta_x} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{\Delta_x}}{\Delta_x} = \left[\frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}}{R_{i-1,j,k}} - \frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{R_{i,j,k}} \right] \cdot \frac{\Delta_y \Delta_z}{k_t \Delta_x}$$

όπου $R_{i-1,j,k} = \frac{\Delta_x}{k_t \Delta_y \Delta_z}$ και $\Delta_{\{x,y,z\}}$ το μήκος του ορθογωνίου σε κάθε κατεύθυνση.

Ομοίως, προκύπτουν οι αντίστοιχες εξισώσεις για τους άξονες y και z , ενώ τελικά παράγεται η παρακάτω εξίσωση:


$$\left[\frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}}{R_{i-1,j,k}} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i+1,j,k}}{R_{i,j,k}} \right] + \left[\frac{T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}}{R_{i,j-1,k}} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j+1,k}}{R_{i,j,k}} \right] + \left[\frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{R_{i,j,k-1}} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1}}{R_{i,j,k}} \right] = -g_{i,j,k} \Delta V$$

όπου $g_{i,j,k} \Delta V$ η συνολική ισχύς και $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$.

Αυτή η διακριτοποίηση αντικατοπτρίζει τη γνωστή θερμική-ηλεκτρική δυαδικότητα, όπου κάθε κόμβος της διακριτοποίησης αντιστοιχίζεται σε έναν κόμβο του κυκλώματος. Θεωρώντας ένα δίκτυο όπου οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αντιστοιχίζονται σε θερμικές αντιστάσεις που συνδέουν γειτονικούς κόμβους και οι πηγές ισχύος αντιστοιχίζονται σε πηγές ρεύματος, το θερμικό πρόβλημα είναι ισοδύναμο με τη λύση ενός κυκλώματος που αποτελείται από γραμμικές αντιστάσεις και πηγές ρεύματος.

Τελικά χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη κομβική ανάλυση (MNA), παράγουμε το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$Gt = p$$

όπου t , το διάνυσμα της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο και G ένας αραιός συμμετρικός πίνακας που περιέχει τις θερμικές αντιστάσεις $G_x = \frac{k_t \Delta_y \Delta_z}{\Delta_x}$, $G_y = \frac{k_t \Delta_x \Delta_z}{\Delta_y}$, $G_z = \frac{k_t \Delta_x \Delta_y}{\Delta_z}$, δημιουργώντας ένα πλέγμα αντιστάσεων όπως φαίνεται στην  Εικόνα 3.

3 Κεφάλαιο – Προσομοίωση Κυκλώματος

3.1 Επισκόπηση

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του παραπάνω αλγορίθμου για ένα πραγματικό κύκλωμα. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών δόθηκε υλοποιημένη σε matlab με τα εξής χαρακτηριστικά: δίνουμε στο πρόγραμμα σαν είσοδο το πλήθος των κύβων x και των κύβων y , τον αριθμό των στρωμάτων, τις θερμικές πηγές και τέλος ένα όνομα για το αρχείο εξόδου που θα περιέχει τα αποτελέσματα. Κάθε μπλοκ διαμορφώνεται ως ένα σύστημα 6 αντιστάσεων που συνολικά δημιουργούν ένα γενικό δίκτυο από αντιστάσεις. Έτσι, με την ΜΠΔ παράγεται ένας πίνακας με τους κατάλληλους συντελεστές που στη συνέχεια τον εισάγουμε σε έναν preconditioner.

Το πρόβλημα με τον ήδη υπάρχοντα κώδικα είναι ότι ενώ ήταν άρτια υλοποιημένος, με τις μαθηματικές έννοιες να λειτουργούν άψογα, τα πεδία `metalThickness` και `metalWidth` είχαν προκαθορισμένες τιμές. Όπως αναφέρθηκε, η 3D δομή δεν είναι μια ομοιόμορφη κατανομή, οπότε και τα μεγέθη αυτά είναι λογικό να αλλάζουν ανάλογα με το εκάστοτε κύκλωμα και μάλιστα να διαφέρουν ανά στρώμα.

3.2 Πληροφορίες για το κύκλωμα

Οι πληροφορίες ενός κυκλώματος, τόσο για τα υλικά όσο και για τις διασυνδέσεις και τις διατάξεις, βρίσκονται στα αρχεία μορφής `def` και `lef`. Σε αυτή την εργασία επιλέξαμε το αρχείο `s27.def` και το αντίστοιχό του αρχείο `lef` τα οποία περιγράφουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Έτσι, αρχικά εξετάζουμε τα δύο αυτά αρχεία για να γίνει διαλογή των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν.

3.2.1 Αρχείο `def`

Ένα αρχείο DEF (Design Exchange Format) είναι μια προδιαγραφή για την φυσική διάταξη ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, σε μορφή ASCII. Περιέχει τις ειδικές πληροφορίες σχεδιασμού του κυκλώματος και είναι μία αναπαράσταση του σχεδίου σε οποιοδήποτε σημείο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Το DEF μεταφέρει λογικά δεδομένα σχεδιασμού σε, και φυσικά δεδομένα σχεδιασμού από, εργαλεία `place-and-route`. Τα λογικά

δεδομένα σχεδιασμού μπορεί να περιλαμβάνουν τις εσωτερικές διασυνδέσεις, την ομαδοποίηση πληροφοριών, καθώς και φυσικούς περιορισμούς. Τα φυσικά δεδομένα περιλαμβάνουν τοποθεσίες χωροθέτησης και προσανατολισμού, δεδομένα γεωμετρικών διαδρομών και λογικές αλλαγές σχεδιασμού. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το αρχείο LEF.

3.2.2 Αρχείο LEF

Το αρχείο LEF (Library Exchange Format) είναι μια προδιαγραφή που αντιπροσωπεύει τις πληροφορίες των φυσικών διατάξεων σχετικά με όλα τα μέρη του ολοκληρωμένου κυκλώματος, σε μορφή ASCII. Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες βιβλιοθήκης για μια κλάση σχεδίων. Η βιβλιοθήκη δεδομένων περιλαμβάνει ορισμούς για τα στρώματα, τα μέσα, τα macro cell και τους τύπους χωροθέτησης. Τα αρχεία LEF είναι στενά συνδεδεμένα με τα αρχεία DEF.

3.3 Τροποποίηση Κώδικα

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να γίνει προσομοίωση για τις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν, δηλαδή για τις προκαθορισμένες τιμές των μεγεθών `metalThickness` και `metalWidth` και για τις πραγματικές τιμές του κυκλώματος όπως αυτές συλλέχθηκαν από το αρχείο `s27.def` και τέλος να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής.

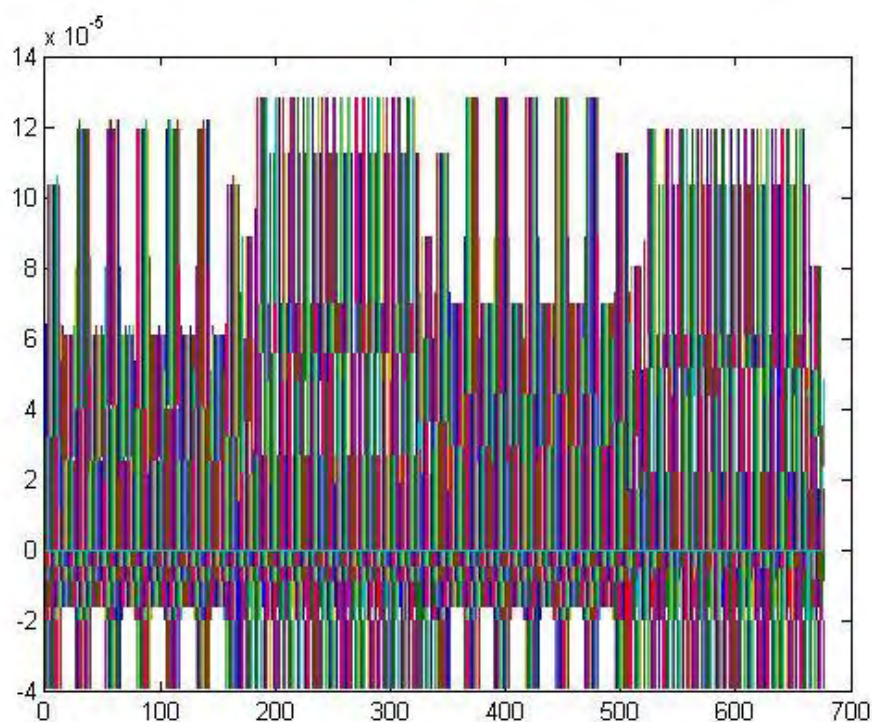
Οι τιμές εισόδου προκύπτουν από το αρχείο `def`. Οπότε έχουμε τα εξής: Πλήθος κύβων x (μέγεθος που πρέπει να είναι ίσο με το πλήθος των κύβων y) ίσο με 13, πλήθος στρωμάτων ίσο με 4 και 34 θερμικές πηγές. Στο πρόγραμμά μας παράγεται ένα σύστημα της μορφής $Ax = b$ και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αφορά τόσο τον πίνακα A όσο και το διάνυσμα x .

Οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα ώστε να τρέξουμε το πραγματικό κύκλωμα είναι προφανείς. Αντί σε κάθε στρώμα να υπολογίζουμε τις αντιστάσεις με τα προκαθορισμένα μεγέθη `metalWidth` και `metalThickness`, τις υπολογίζουμε σε κάθε στρώμα ξεχωριστά φορτώνοντας τα αντίστοιχα μεγέθη του πλάτους και του πάχους.

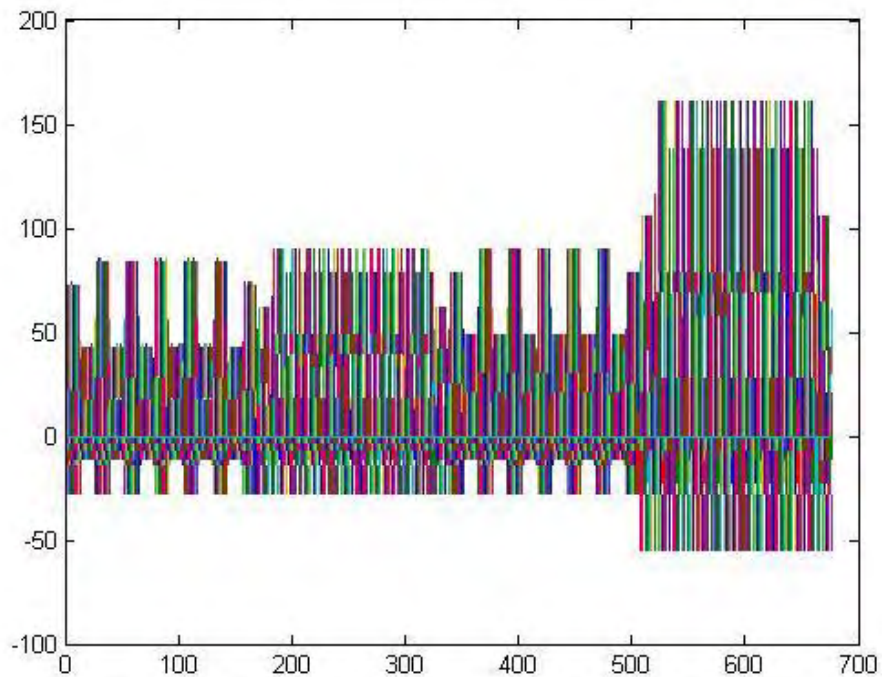
3.4 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον πίνακα A βρίσκονται στις παρακάτω εικόνες. Όπως καταλαβαίνουμε εφόσον το πλήθος των κύβων x και των κύβων y είναι 13, σε κάθε στρώμα παράγουμε μια περιοχή 169 κύβων. Με το πλήθος των στρωμάτων να είναι 4 οι συνολικοί κύβοι γίνονται 676.

Στην Εικόνα 4 είναι τα αποτελέσματα του πίνακα A για τις προκαθορισμένες τιμές και στην Εικόνα 5 για τις πραγματικές. Κάθε χρώμα αποτελεί μία γραμμή του πίνακα και η τιμή στον οριζόντιο άξονα την αντίστοιχη στήλη του. Ο κάθετος άξονας αναπαριστά την αριθμητική τιμή του εκάστοτε στοιχείου του πίνακα.

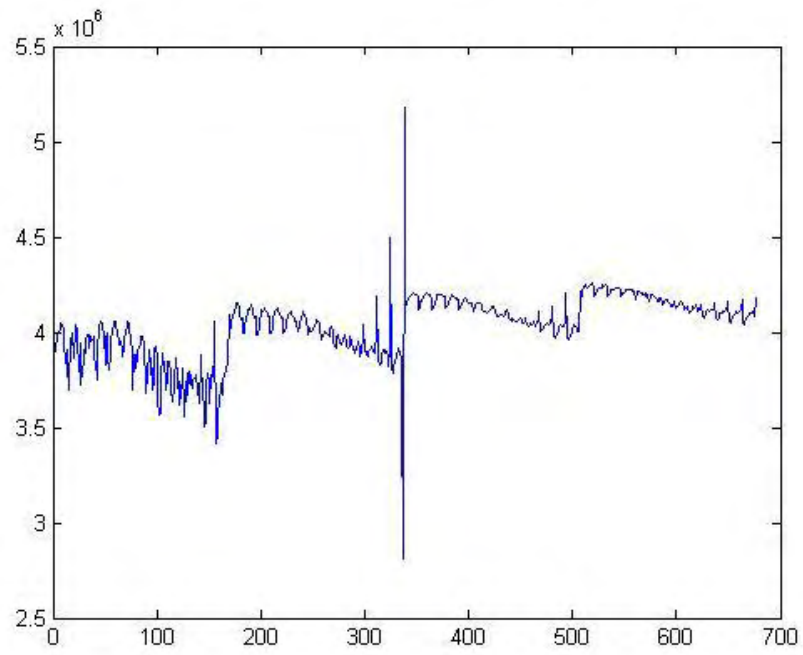


Εικόνα 4: Πίνακας A με τις default τιμές των μεγεθών metalThickness & metalWidth

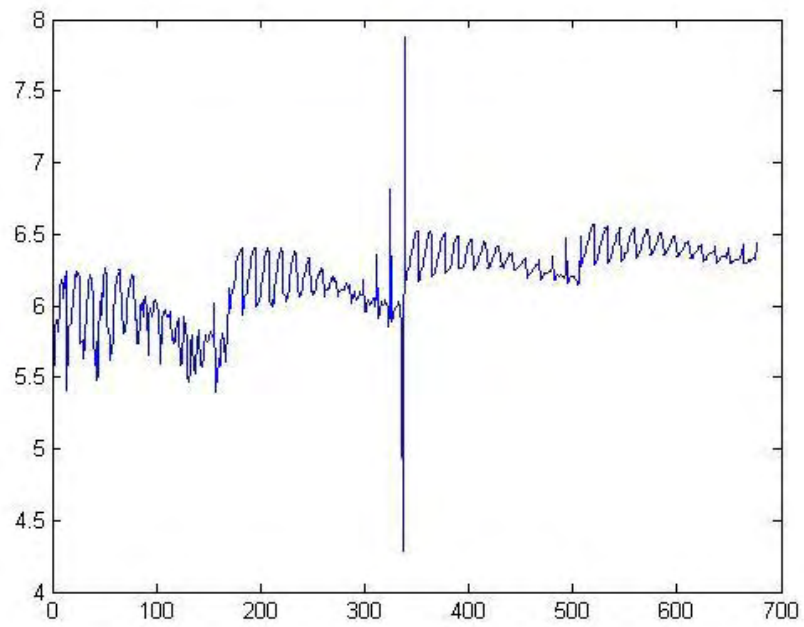


Εικόνα 5: Πίνακας A με τις πραγματικές τιμές των μεγεθών metalThickness & metalWidth

Στη συνέχεια από τη λύση του συστήματος προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις για το διάνυσμα x . Ομοίως ο κάθετος άξονας αναπαριστά την τιμή του αντίστοιχου στοιχείου του διανύσματος που αναγράφεται στον οριζόντιο άξονα. Στην Εικόνα 6 έχουμε το διάνυσμα x όπως αυτό προέκυψε από τις προκαθορισμένες τιμές, ενώ στην Εικόνα 7 από τις πραγματικές τιμές.



Εικόνα 6: Διάγραμμα x , από το σύστημα με τις default τιμές



Εικόνα 7: Διάγραμμα x , από το σύστημα με τις πραγματικές τιμές

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε τα αποτελέσματα από τις προκαθορισμένες τιμές όχι μόνο είναι λάθος, αλλά επίσης δεν πλησιάζουν καθόλου τις πραγματικές.

Προφανώς για μια προσομοίωση είναι απαραίτητο η είσοδος να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα έτσι ώστε να έχουμε προσεγγιστικά αποτελέσματα. Είναι απαραίτητο δηλαδή να λαμβάνουμε υπόψιν μας τις τιμές των μεγεθών κάθε ολοκληρωμένου κυκλώματος ξεχωριστά.

3.5 Μελλοντικοί Στόχοι

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσομοίωση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος και τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα εφόσον ο αλγόριθμός μας είναι λειτουργικός. Το πρόβλημα όμως είναι ότι εμείς επιλέξαμε ένα συγκεκριμένο αρχείο DEF και το αντίστοιχό του LEF, βρήκαμε εκεί τις τιμές που χρειαζόμασταν και κάναμε τις κατάλληλες αλλαγές στον κώδικα, όπως επίσης και δώσαμε την ανάλογη είσοδο.

Μελλοντικά οι προσπάθειες που θα μπορούσαν να γίνουν είναι να μετατραπεί το πρόγραμμά μας έτσι ώστε να είναι καθολικό. Δηλαδή να φορτώνει από μόνο του τα απαραίτητα στοιχεία από τα εκάστοτε αρχεία DEF και LEF και τελικά να λυθεί το θερμικό πρόβλημα.

Βιβλιογραφία

- [1] *LEF/DEF Language Reference*.
- [2] Z. Feng and P. Li, “Fast thermal analysis on gpu for 3d-ics with integrated microchannel cooling”, in *Computer-Aided Design (ICCAD), 2010 IEEE/ACM International Conference on, 2010*, pp. 551-555.
- [3] W. Huang, “Hotspots chip and package compact thermal modeling methodology for vlsi design”, *Ph.D. dissertation, University of Virginia, 2007*.
- [4] N. E. G. S. P. T. Konstantis Daloukas, Alexia Marnari, “Fast Electrical-Thermal Co-Simulation of Large-Scale Power Delivery Networks on Massively Parallel Architectures”.
- [5] T. yuan Wang, Y. min Lee, C. Chen, and C. C. ping Chen, “3d thermal-adi-an efficient chip-level transient thermal simulator”, in *ACM International Symposium on Physical Design (ISPD), ACM 1581136501/03/0004, 2003*, pp. 10-17.
- [6] Alexia Marnari, “Thermal Analysis of 3D Integrated Circuits”.
- [7] X.-X. Liu, Z. Liu, S.-D. Tan, and J. Gordon, “Full-chip thermal analysis of 3d ics with liquid cooling by gpu-accelerated gmres method”, in *Quality Electronic Design (ISQED), 2012 13th International Symposium on, 2012*, pp. 123-128.
- [8] S. Pan, N. Chang, and J. Zheng, “A new methodology for ic-package thermal co-analysis in 3d ic environment,” in *Electrical Design of Advanced Packaging Systems Symposium (EDAPS), 2010 IEEE, 2010*, pp. 1-4.
- [9] M. Pedram and S. Nazarian, “Thermal modeling, analysis, and management in vlsi circuits: Principles and methods,” *Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 8, pp. 1487-1501, 2006*.
- [10] H. Qian and S. Sapatnekar, “Fast poisson solvers for thermal analysis”, in *Computer-Aided Design (ICCAD), 2010 IEEE/ACM International Conference on, 2010*, pp. 698-702.

- [11] B. Wang and P. Mazumder, "Accelerated chip-level thermal analysis using multilayer green's function", *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 325-344, 2007.
- [12] H. Xu, V. Pavlidis, and G. De Micheli, "Analytical heat transfer model for thermal through-silicon vias", in *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE), 2011, 2011*, pp. 1-6.
- [13] S. S. S. Yong Zhan, Sanjay V.Kumar, "Thermally aware design".
- [14] K. Banerjee, A. Mehrotra, A. Sangiovanni-Vincentelli, and C. Hu, "On thermal effects in deep sub-micron vlsi interconnects", in *Design Automation Conference, 1999. Proceedings. 36th*.
- [15] X. Chen, "Performance, power, and thermal modeling and optimization for high-performance computer systems," *Ph.D. dissertation, University of Michigan, 2011*.
- [16] B. Goplen and S. Sapatnekar, "Efficient thermal placement of standard cells in 3D ICs using a force directed approach," in *Computer Aided Design, 2003. ICCAD-2003. International Conference on, 2003*.
- [17] C. Hu, "Future cmos scaling and reliability," *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 5, pp. 682-689, 1993.
- [18] M. N. Ozisik, "Heat transfer: A basic approach." NY:McGraw-Hill.
- [19] C. Halford, "Ir-drop analysis," *Advanced Layout Solutions Ltd, Tech. Rep.*
- [20] A. A. Khan, "Design tools for reliability analysis".
- [21] K. Banerjee, M. Pedram, and A. H. Ajami, "Analysis and optimization of thermal issues in high-performance vlsi", in *ACM/SIGDA Int. Symp. Physical Design*.
- [22] S. S. Sapatnekar, "Thermally aware design (chapter 2)".
- [23] T.-Y. Wang and C. C.-P. Chen, "3-d thermal-adi: a linear-time chip level transient thermal simulator", *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 12.

- [24] S. Zhan, Kumar, “*Thermally aware design (chapter 3)*”.
- [25] A. Sridhar, A. Vincenzi, M. Ruggiero, and D. Atienza, “*Neural network-based thermal simulation of integrated circuits on gpus*”, *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 1, pp. 23-36, 2012.