

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ
ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Գասպարյան Տիգրան Աշոտի

**ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԻՆՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ
ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Ե.13.02 «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման համար

Երևան 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Гаспарян Тигран Ашотович

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.02– “Системы автоматизации”

Ереван 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝

տ.գ.թ. Ա. Գ. Հարությունյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Հ.Ս. Սուքիասյան
տ.գ.թ. Ա.Ա. Գևորգյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Հայ-ռուսական
համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2018թ. հունիսի 28-ին, ժամը 12⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող - «Կառավարման և ավտոմատացման» 032 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք)
Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2018 թ. մայիսի 25-ին:

032 Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար,



Ա.Ա. Մելիքյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель:
Официальные оппоненты:

к.т.н. А.Г. Арутюнян
д.т.н. А.С. Сукиасян
к.т.н. А.А. Геворгян

Ведущая организация:

Российско-армянский
университет

Защита диссертации состоится 28 июня 2018г. в 12 ч. на заседании Специализированного совета 032 - “Управления и автоматизации” действующего при Национальном политехническом университете Армении (адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 25 мая 2018г.

Ученый секретарь

Специализированного совета 032 к.т.н.



А.В. Меликян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. За последние 50 лет полупроводниковая промышленность развивалась по закону Мура, согласно которому количество транзисторов в интегральных схемах (ИС) удваивается каждые 18 месяцев. Это, в свою очередь, приводит к масштабированию ряда параметров ИС, из которых наиболее важными в настоящее время являются энергопотребление и высокая производительность.

Значительное увеличение энергопотребления приводит к высоким рабочим температурам и большой разности температур на поверхности ИС и как следствие, к высокому риску с точки зрения тепловой надежности. Тепловой баланс становится приоритетным вопросом в современном автоматизированном программном обеспечении для дизайна электронных устройств.

Высокий уровень энергопотребления способствует увеличению рабочей температуры, которая может превышать 100°C . Такие высокие температуры отрицательно влияют на параметры ИС, что может привести к сбою работы ИС. Примером предсказания таких отказов является закон Блейка, который гласит, что тепловая надежность экспоненциально зависит от уровня температуры.

С каждой новой технологией создаются транзисторы, которые переключаются быстрее по сравнению с транзисторами предыдущего поколения. Ранее этот электрический атрибут транзистора позволял процессору работать на еще более высоких частотах. Это приводило к тому, что критерий производительности компьютеров, измеряемых отраслевыми показателями, например количеством операций в секунду, продолжал улучшаться стремительными темпами. Компьютерная инженерия не изменилась с тех пор, как фон Нейман представил свою концепцию в 1945 году. На протяжении многих лет почти не уделялось внимания тому факту, что потребляемая мощность в интегральных схемах росла с каждым новым поколением технологий согласно промышленному принципу: “высокая производительность любой ценой”. Этому принципу был положен конец в начале последнего десятилетия, когда некоторые ИС достигли своего допустимого предела. В то же время этот принцип выражается в нарушении закона Мура. В результате физических ограничений на рассеяние мощности один из двух компонентов закона Мура должен был быть отложен для создания интегральных схем, которые могли бы работать практически в тепловых условиях. В качестве жертвы была выбрана частота, которая находилась в диапазоне нескольких гигагерц с середины последнего десятилетия.

Эти ограничения максимально используемой частоты повлияли на уровень развития компьютерной индустрии, что привело к развитию таких методов, как сложные алгоритмы программного обеспечения и интеллектуальное управление командами для повышения скорости, частично компенсируя вышеуказанные условия.

Во избежание таких проблем используются радиаторы и теплоотводящие устройства. Однако их применение практически невозможно в переносных устройствах. Сказанное диктует необходимость использования таких подходов к размещению элементов на этапе физического проектирования ИС, которые могут привести к снижению общего уровня температуры и повышению тепловой надежности.

В соответствии с приоритетами, установленными ассоциацией полупроводниковой промышленности, проблема тепловой надежности ИС имеет первостепенное значение. С этой точки зрения в настоящее время тепловое размещение элементов ИС рассматривается как эффективный способ повышения тепловой надежности путем выравнивания теплового поля.

Проблема тепловой надежности ещё больше обостряется в случае трехмерных ИС.

Трехмерная технология вертикальной интеграции (3D IC) позволяет надеяться, что закон Мура получит новое развитие. В частности, ограничение одной поверхности полупроводникового кристалла за счет сокращения длины межсоединений в одном слое трехмерной ИС способствует уменьшению задержек в них и, как следствие, увеличению производительности ИС.

Трехмерная интеграция имеет много преимуществ как на схематическом, так и на архитектурном уровнях. Однако эти преимущества вносят как физические ограничения, так и увеличение связей между компонентами и параметрами процессора. Ключевым ограничением для разработки трехмерных ИС является их тепловая надежность.

В результате оценка и оптимизация реалистичного изображения теплового поля при проектировании ИС становятся важным инструментом с точки зрения повышения тепловой надежности. Так как тепловое поле в значительной степени зависит от размещения элементов, тепловое размещение элементов становится мощным инструментом для повышения тепловой надежности ИС.

Если учесть тот факт, что в настоящее время в автоматизированных системах проектирования ИС отсутствуют инструменты теплового размещения, то очевидно, что параллельно с увеличением интеграции ИС вопросы создания и применения эффективных методов, алгоритмов и программно-инструментальных средств теплового размещения, способствующих устранению тепловых градиентов, становятся все более актуальными в сфере повышения тепловой надежности ИС.

Предложенные в диссертации электротепловые динамические модели, эволюционные алгоритмы выравнивания теплового поля и разработанное на их основе программное обеспечение направлены на повышение тепловой надежности ИС.

Объект исследования. Воздействие высокого уровня температуры на надежность ИС. Методы их прогнозирования и оптимизации.

Цель работы. Разработка и исследование методов моделирования теплового поля и алгоритмов выравнивания для повышения тепловой надежности ИС, а также создание на основе этих методов автоматизированного программного инструмента для обеспечения тепловой надежности.

Методы исследования. При выполнении диссертации были использованы теория моделирования теплового поля ИС, методы их математического анализа, современные алгоритмы для распределения элементов с их математическим аппаратом, системы электрического моделирования HSPICE и программно-ориентированных методов моделирования.

Научная новизна. В диссертации получены результаты, научная новизна которых сводится к следующему:

- предложены новые автоматизированные подходы к проблеме матричного синтеза, основанные на эволюционных алгоритмах и приводящие к

выравниванию теплового поля ИС и, тем самым, повышению тепловой надежности;

- предложены автоматизированные динамические модели теплового поля ИС, позволяющие учитывать активность элементов ИС в процессе измерения температуры и, тем самым, повышающие адекватность моделирования;
- введение идеи целевой мутации в эволюционных алгоритмах размещения и выработаны соответствующие процедуры, повышающие эффективность эволюционного алгоритма.

Практическая ценность работы. Программный инструмент “Thermal Modeling and Improvement Compiler” был разработан с использованием алгоритмов моделирования и оптимизации, предложенных в диссертации. Он дает возможность визуализации теплового поля ИС, благодаря чему разработчик может легко обнаружить большие температурные градиенты и использовать возможности программного обеспечения для выравнивания теплового поля.

Программный инструмент был разработан в среде C ++ 11/14, Qt5.10 и предназначен для использования в операционных системах GNU / Linux и Windows.

Достоверность научных положений подтверждена математическим обоснованием разработанных методов моделирования и выравнивания теплового поля, а также сравнительными результатами практических исследований.

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанное на основе диссертации программное средство “Thermal Modeling and Improvement Compiler” было внедрено в ЗАО “Синописис Армения”. Оно используется при проектировании для отображения теплового поля и на основе результатов распределения элементов ИС.

Основные положения, выносимые на защиту:

- средства автоматизации электротепловой динамической модели двумерных ИС;
- средства автоматизации электротепловой динамической модели трехмерных ИС;
- средства автоматизированного выравнивания теплового поля двумерной ИС на основе эволюционного алгоритма;
- средства автоматизированного выравнивания теплового поля трехмерных ИС на основе эволюционного алгоритма;
- автоматизированное программное средство “Thermal Modeling and Improvement Compiler”, разработанное на основе предложенных методов электротеплового динамического моделирования и эволюционных алгоритмов оптимизации.

Апробация работы. Основные научные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- Международном симпозиуме по проектированию и тестированию "EWDTs: IEEE East-West Design & Test Symposium" (Нови Сад, Сербия, 2017 г.);
- Международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" - СИЭТ- 18 (Одесса, Украина, 2017 г.);
- XI Международной научной конференции "Полупроводниковая микро- и нанoeлектроника" (Ереван, Армения, 2017 г.)

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в шести печатных трудах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы из 90 наименований, четырех приложений. Основной текст диссертации составляет 117 страниц, включая 56 рисунков, 11 таблиц. Общий объем работы, включая приложения, составляет 145 страниц. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность диссертации, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современные вызовы физического проектирования ИС с точки зрения тепловой надежности. Приведены статистические данные о степени интеграции современных ИС. Обосновано, что имеющаяся на сегодняшний день степень интеграции может создавать проблемы при проектировании ИС с точки зрения тепловой надежности.

Проведены обзор и анализ литературы в области проектирования ИС с точки зрения повышения тепловой надежности. Приведен фактор тепловой надежности ИС с точки зрения электромиграции, известный как закон Блейка, который определяет минимум времени, после которого появляются проблемы в работе ИС:

$$\tau_{min} = AJ^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где A – параметр, зависящий от технологии (микроструктуры); J – плотность тока; n – степенной показатель плотности тока, принимающий значения $1, \dots, 2$; E – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура элемента ИС.

Обсуждаются методы размещения ячеек ИС как способ повышения тепловой надежности. Приведен фактор равномерного размещения ячеек ИС:

$$f_T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N |P_i - P_j| d_{ij} \rightarrow \min_{i,j \in M}, \quad (2)$$

где P_i – мощность i -го элемента ИС; d_{ij} – расстояния между i -ым и j -ым элементами, M – множество возможных переходов элементов.

Исходные алгоритмы теплового распределения элементов ИС можно разделить на два основных класса:

- алгоритмы, основанные на фрагментации;
- матричные алгоритмы.

Алгоритмы, основанные на фрагментации, в случае большого количества элементов приводят к эвристическим неопределенностям и снижению качества распределения.

В настоящее время известные матричные алгоритмы для размещения элементов ИС состоят из последовательности четко определенных шагов, которые всегда дают один и тот же результат для одних и тех же входных данных. Недостатком

таких алгоритмов является то, что после определенного количества итераций эти алгоритмы приводят к определенному локальному оптимуму, они не учитывают существование более лучшего распределения, чем полученный результат. Матричные алгоритмы стремятся достичь минимального предела энергопотребления на локальном участке, но не учитывают общий результат.

Обсуждаются методы теплообмена между элементами ИС, а также современные методы моделирования теплового поля ИС. Основная функция теплообмена имеет вид

$$\rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla(k(x, y, z, T), \nabla T) + g(x, y, z, t), \quad (3)$$

где ρ - плотность материала; C - удельная теплоемкость; g - объемная плотность источника тепла.

Существует ряд методов решения функций теплообмена (3) - как аналитических, так и численных. К числу аналитических методов относятся:

- преобразование Кирхгофа;
- преобразование Кирхгофа плюс приближение Лапласа для более точного решения;
- методы, основанные на функции Грина.

Первые два метода решения функции (3) недооценивают время, необходимое для достижения наблюдаемой температуры, на ~ 35% и переоценивают уровень температуры на ~ 4%.

Методы, основанные на функции Грина, имеют высокую точность на локальных участках и высокую производительность при наличии соответствующих программных средств. Но эти методы имеют огромные недостатки в случае моделирования теплового поля сложных систем. К этим недостаткам относятся отсутствие очевидного решения и необходимость получения максимальной четкой системы (разбиение сложной системы на маленькие и четкие подсистемы).

Помимо аналитических методов моделирования теплового поля, известны также численные методы. Методы цифрового моделирования основаны на сетевых структурах. Наиболее распространенными являются методы конечных разностей и методы конечных элементов. Недостатком этих методов является необходимость большого количества времени для вычислений, даже при использовании современных мощных компьютеров.

Резюмируя вышесказанное, можем утверждать, что:

- с точки зрения тепловой надежности, проблемы моделирования и выравнивания теплового поля при проектировании современных ИС постоянно требуют решения и являются препятствующими факторами;
- существующие решения этих проблем не приводят к удовлетворительным результатам и нуждаются в развитии.

Во второй главе рассмотрены разработанные методы моделирования теплового поля ИС и методы его выравнивания с помощью предлагаемых методов теплового размещения.

Для моделирования теплового поля был изучен электротепловой подход, который основан на соответствии электрических и тепловых параметров. Это соответствие было доказано путем сравнения законов Ома и Фурье:

$$Q = kS \frac{T_1 - T_2}{d_2 - d_1}, \quad (4)$$

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} A, \quad (5)$$

где d_1 и d_2 - координаты поверхностей, между которыми передается тепловой поток Q по площади S ; T_1 и T_2 - соответственно температуры этих поверхностей; ρ - удельное сопротивление; I – мощность тока, протекающего от координаты x_1 к x_2 по площади A .

После перехода к границе для функций (4) и (5) доказываются соответствие между основными тепловыми и электрическими параметрами и явлениями. Основной список соответствий параметров приведен в табл. 1.

На основе вышесказанного предложены методы моделирования теплового поля ИС. Предложенный в диссертации метод для двумерных ИС основан на динамической электротепловой модели элементарной тепловой ячейки (рис. 1).

Таблица 1

Соответствие тепловых и электрических параметров

Тепловые параметры	Электрические параметры
Теплота (Дж)	Электрический заряд (К)
Температура ($^{\circ}\text{C}$ или К)	Электрическое напряжение (В)
Тепловое сопротивление ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$ или K/W)	Электрическое сопротивление (Ом)
Тепловой поток (W)	Сила тока (А)
Электрическая емкость (Дж/ $^{\circ}\text{C}$ или Дж/К)	Электрическая емкость (Ф)

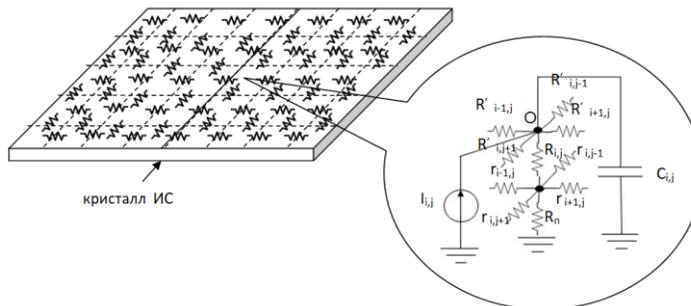


Рис. 1. Электротепловая динамическая модель элементарных тепловых ячеек: O - топологический центр тепловой ячейки. Тепловое сопротивление наблюдаемой ячейки выражается сопротивлением $R_{i,j}$. Сопротивления $R_{i+1,j}$, $R_{i-1,j}$, $R_{i,j-1}$, $R_{i,j+1}$ отражают теплоустойкость, обусловленную активной частью полупроводниковой структуры, между наблюдаемым элементом и его смежными элементами, а сопротивления $r_{i+1,j}$, $r_{i-1,j}$, $r_{i,j-1}$, $r_{i,j+1}$ - теплоустойкостью пассивной части полупроводниковой структуры; $C_{i,j}$ выражает теплоемкость наблюдаемой тепловой ячейки, а R_n - тепловое сопротивление корпуса ИС.

Предлагаемая электротепловая модель, по сравнению с существующими аналогичными моделями, имеет преимущества, в частности:

- наличие отдельного теплового сопротивления для активных и пассивных участков полупроводниковой структуры;
- динамический характер электротепловой модели, обусловленный теплоемкостью $C_{i,j}$.

Значения сопротивления, лежащие в основе предлагаемой электротепловой модели, могут быть определены по формуле расчета термостойкости:

$$R = \frac{\Delta d}{kS}. \quad (6)$$

Выбор параметров при расчете соответствующего теплового сопротивления представлен в табл. 2.

Таблица 2

Данные параметров при расчете теплового сопротивления

	R'_{ij}	r_{ij}	R_{ij}
Δd	Расстояние между центрами тепловых ячеек	Расстояние между центрами тепловых ячеек	Толщина полупроводниковой платформы
S	Произведение линейного размера теплового элемента и глубины его активной части	Произведение линейного размера тепловой ячейки и толщины полупроводникового кристалла	Поверхность тепловой ячейки
k	Коэффициент удельной теплопроводности	Коэффициент удельной теплопроводности	Коэффициент удельной теплопроводности

Максимальные значения источников питания определяются в соответствии с тепловой энергией тепловых ячеек. В случае использования библиотек цифровых стандартных ячеек при совпадении топологических и тепловых ячеек мощность тепловых ячеек определяется уравнением

$$P = P_D K \omega + P_S, \quad (7)$$

где P_S - статическая мощность наблюдаемой топологической ячейки; P_D - динамическая удельная мощность; K - уровень активности; ω - рабочая частота библиотеки цифровых стандартных ячеек.

В случае несовпадения топологических и тепловых ячеек используется альтернативная формула расчета:

$$P = \sum_{k=1}^n P_k \frac{S_k \cap S_c}{S_c} K_k \omega, \quad (8)$$

где S_k - поверхность k-й топологической ячейки; S_c - площадь тепловой ячейки.

Теплоемкость определяется выражением

$$C_t = C \rho V, \quad (9)$$

где C и ρ - соответственно удельная теплоемкость и плотность материала ИС; V - количество материала, производная площади поверхности теплового элемента и высоты кристалла ИС. Динамический характер электротепловой модели позволяет получить более точное представление о температурном уровне. Аналогичным образом статические модели дают четкое значение температуры, не позволяя

определить затраченное время для достижения этого уровня или последующее изменение температуры.

Для моделирования теплового поля трехмерных ИС представлены две электротепловые модели (рис. 2).

На рис. 3 представлены две модели трехмерной ИС с двумя уровнями. Учитывая, что имеются два вида интеграции уровней трехмерных ИС: face-to-face (рис. 2 а), fast-to-back (рис. 2 б), для каждого из них нужна отдельная модель. Как видно из рис. 3, по сравнению с двумерной моделью, добавлены междууровневые резисторы, и в зависимости от вида интеграции точки присоединения конденсаторов и источников тока меняются вместе со значениями резисторов активной и пассивной частей кристалла.

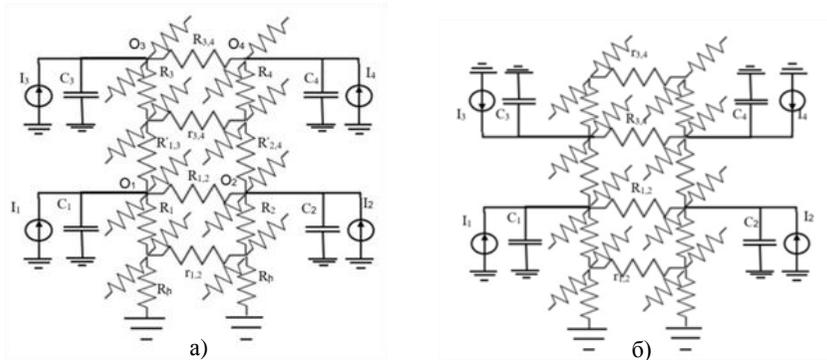


Рис. 2. Динамические электротепловые модели трехмерных ИС

Основываясь на представленных в диссертации методах динамического моделирования, представлены тестовые данные (рис. 3) для схемы c17-iscas85 с использованием программы HSPICE.

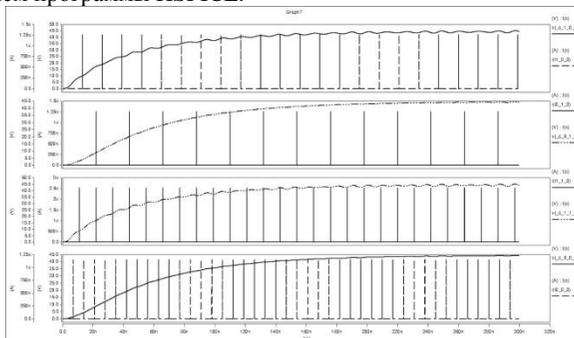


Рис. 3. Уровни напряжения тестовой схемы c17-iscas85

При использовании динамических электротепловых моделей напряжения в точках O_j являются соответствующей температурой в этих точках.

Кроме методов моделирования теплового поля ИС, во второй главе также рассмотрены вопросы начального размещения элементов ИС для выравнивания теплового поля.

В диссертации на основе анализа литературы предлагаются методы начального размещения. Известно, что матричные алгоритмы размещения можно идентифицировать как алгоритмы, решающие проблему синтеза матрицы (ПСМ). ПСМ является комбинаторным вопросом оптимизации. Если представить мощности элементов ИС как массу чисел, соответствующих их значениям, то цель ПСМ будет состоять в том, чтобы синтезировать матрицу из набора чисел так, чтобы внутренние элементы каждой подобласти данного измерения не превышали заданного значения. В целом математическая формулировка ПСМ заключается в следующем: даны целые числа t, m, n и список неотрицательных чисел размером $m*n$; необходимо синтезировать матрицу из списка заданных чисел так, чтобы каждая из ее t подобластей была минимизирована. Критерий качества распределения можно суммировать следующим образом:

$$F = \max_{j \in E} \sum_{i \in \Omega_j} P_i \rightarrow \min_{j \in M} \quad (10)$$

где E - множество индексов подобластей; M - множество возможных переходов элементов; j - очередной индекс подобласти; Ω_j - очередная подобласть; i - очередной элемент подобласти; P_i - мощности очередного элемента. При $t \geq 2$ ПСМ является полной NP проблемой. Все существующие методы решения этой проблемы имеют недостаток: они ищут локальный минимум, но не пытаются достичь выравнивания всей тепловой поверхности ИС.

Для решения вышеуказанных проблем в диссертации предлагаются эволюционные алгоритмы размещения элементов для двумерных и трехмерных ИС. Представленные оба алгоритма состоят из шести основных шагов:

- 1) генерация популяции входящих поколений;
- 2) скрещивание;
- 3) мутация;
- 4) селекция;
- 5) проверить условие $|F_p - F_c| < \epsilon$ и в случае отказа вернуться к этапу 2, в противном случае - перейти к этапу 6, где F_p и F_c - фактор размещения (10) при нынешней и предыдущей итерациях, а ϵ - приемлемая четкость алгоритма;
- 6) конец.

В диссертации каждый шаг представлен отдельно для каждого алгоритма. Ниже приведены задачи, которые рассматриваются на представленных этапах.

Генерация популяции входящих поколений. Для двумерных ИС входящее, начальное поколение эволюционного алгоритма может быть массивом матриц с элементами, упорядоченными случайным образом, или другим алгоритмом, или некоторым предопределенным распределением элементов. Для трехмерных ИС входные матрицы являются трехмерными.

Скрещивание и мутация. Стадии скрещивания и мутации объединяются и являются двумя последовательными компонентами одной и той же процедуры. В качестве первого компонента выступает скрещивание, которое способствует улучшению качества следующего поколения. В качестве второго компонента выступает мутация, которая использует некоторую случайность, помогая избежать

локального оптимума. Для скрещивания родителями следующего поколения могут быть две матрицы, коэффициент (10) которых является наименьшим для подобласти t^*t при двумерной ИС и t^*t^*t - при трехмерной ИС. Для выбранных матриц выполняются следующие действия:

- вычисляется сумма всех подобластей размерами t^*t или t^*t^*t :

$$P_{\Omega_j} = \sum_{i \in \Omega_j} P_i \quad j \in E;$$

- на основе вычисленных значений выбираются подобласти с наибольшими и наименьшими суммами элементов Ω_{max} , Ω_{min} ;
- выполняется перемещение наибольших и наименьших элементов матриц Ω_{max} и Ω_{min} от одной матрицы к другой, принимая во внимание тот факт, что элементы остаются только на четко определенном уровне при трехмерных ИС.

Во избежание локального оптимума перемещение наибольших и наименьших элементов от одной матрицы к другой выполняется не непосредственно друг с другом, а случайным образом, что приводит к мутации распределения. Для этой цели необходимо выполнить следующие действия:

- максимальный элемент (max) из Ω_{max} случайно меняется местами с любым элементом из Ω_{min} при условии, что он не займет место наименьшего элемента в Ω_{min} и останется на своем уровне при трехмерных ИС;
- аналогичная операция выполняется с наименьшим элементом (min) из Ω_{min} при условии, что он не займет предыдущую позицию max и останется на своем уровне при трехмерных ИС.

Селекция. Целевая функция (10) вычисляется для каждой из сгенерированных новых матриц, и если полученное значение меньше, чем у одной из родительских матриц предыдущего поколения, то эта матрица добавляется к родительским матрицам следующего поколения, в которые больше не включена матрица с наибольшим значением целевой функции.

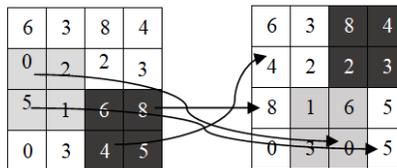


Рис. 4. Одна итерация алгоритма для двумерных ИС

На рис. 4 представлена одна итерация эволюционного алгоритма выравнивания теплового поля ИС. В диссертации приведены исследовательские данные представленных алгоритмов, полученные с помощью специально разработанной программы. Исследовательские данные как для двумерных, так и для трехмерных ИС приведены на рис. 5 - 7.

Разработанный алгоритм выравнивает входную матрицу на 23...32% за 3...4 итерации. Полученные результаты показывают, что при увеличении размеров подобласти может быть достигнуто выравнивание до 30...37%.

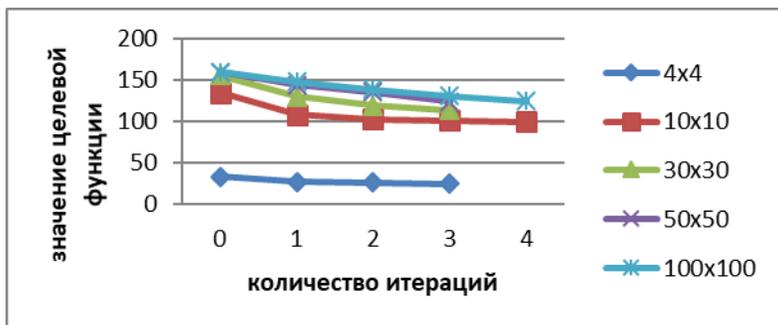


Рис. 5. Изменение целевой функции в случае разных размеров подобласти при двумерной ИС

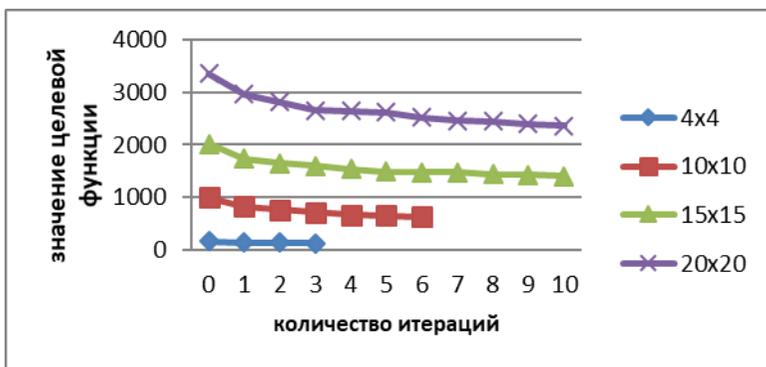


Рис. 6. Изменение целевой функции в случае матрицы размера 50x50 при соответствующих размерах подобласти при двумерной ИС

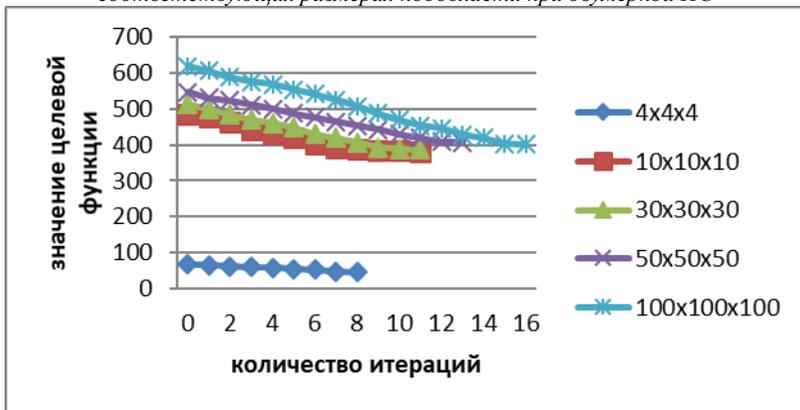


Рис. 7. Изменение целевой функции в случае трехмерной ИС и подобласти с размерами 4x4x4

Исходя из данных исследования, можно сказать, что эволюционный алгоритм трехмерного выравнивания теплового поля после усреднения в среднем 12 итераций приводит к выравниванию теплового поля от 25 до 35%.

В третьей главе рассмотрены алгоритмы, на которых основана генерация динамических электротепловых моделей. Также проведен анализ эволюционных алгоритмов размещения.

Доказано, что независимо от типа ИС, сложность алгоритмов моделирования выражается величиной $O(m)$, где m - количество тепловых элементов, полученных в результате дискретизации ИС с шагом d .

В диссертации на основе вышеупомянутых алгоритмов и методов моделирования предложен автоматизированный маршрут проектирования (рис. 8).

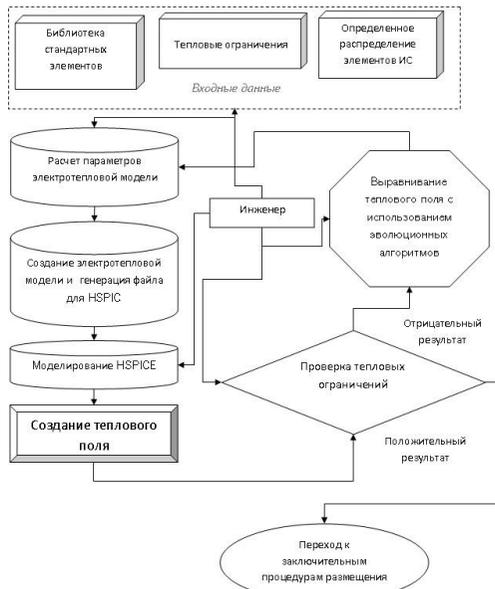


Рис. 8. Автоматизированный маршрут проектирования

В четвертой главе представлено программное обеспечение методов повышения тепловой надежности. Оно основано на вышеупомянутых методах моделирования и эволюционных алгоритмах. Представлен автоматизированный программный инструмент “Thermal Modeling and Improvement Compiler” (TMIC) для повышения тепловой надежности.

Разработанный инструмент обладает следующими возможностями:

- отображение элементов как двумерных, так и трехмерных ИС в двумерном пространстве;
- отображение поля мощностей в трехмерном виде;
- отображение теплового поля в трехмерном виде;

- изменение размеров тепловых ячеек, что дает возможность обеспечить компромисс между точностью и машинным временем моделирования;
- масштабирование любого выбранного участка трехмерного теплового поля или поля мощностей;
- отображение координатной сетки в трехмерном виде;
- выравнивание теплового поля путем применения эволюционных алгоритмов.

Разработанное программное средство было апробировано для теплового моделирования как двумерных, так и трехмерных тестовых схем, например: UltraSPARC T2 (рис. 9).

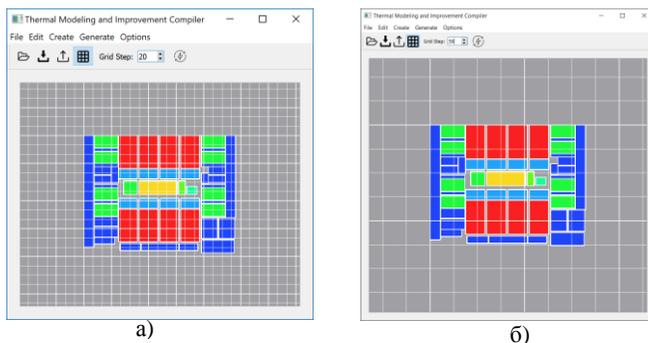


Рис. 9. Тепловые сетки с различным шагом для ИС “UltraSPARC T2:
а – 20 мкм, б – 50 мкм

Для представленных на рис. 9 тепловых сеток ИС “UltraSPARC T2” были получены тепловые поля, приведенные на рис. 10.

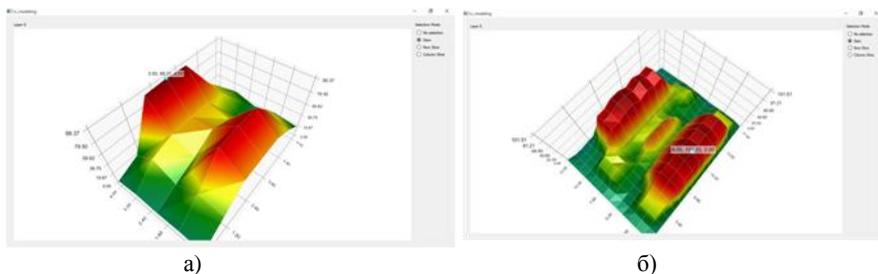


Рис. 10. Тепловые поля ИС UltraSPARC T2:
а – 20 мкм, б – 50 мкм

Тестовые результаты для трехмерной ИС приведены на рис. 11 и 12.

В диссертации приведен пример работы эволюционного алгоритма (рис. 13).

Произведен анализ эффективности разработанного программного средства в зависимости от количества размещаемых элементов, шага дискретной сетки и площади размещения (рис. 14, 15).

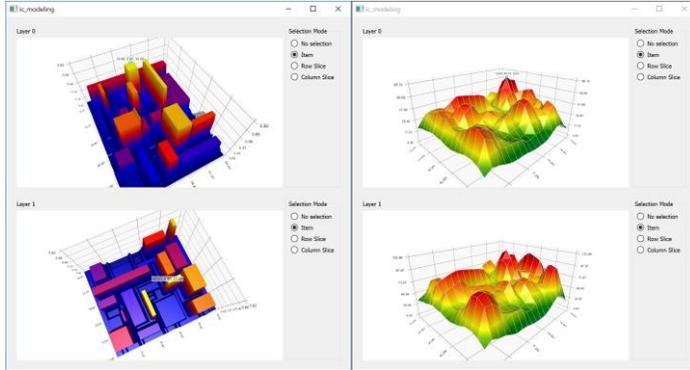


Рис. 11. Поля мощностей и тепловые поля трехмерной ИС

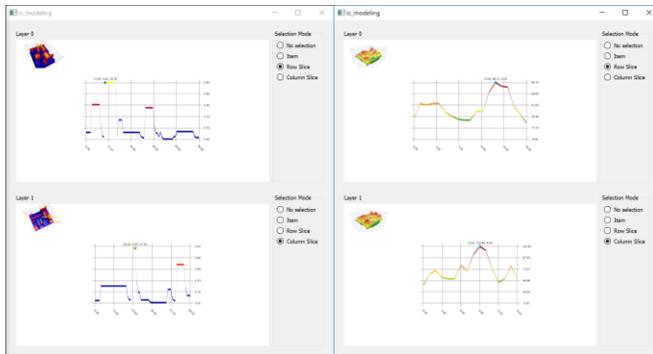


Рис. 12. Альтернативный вид поля мощностей и теплового поля трехмерной ИС

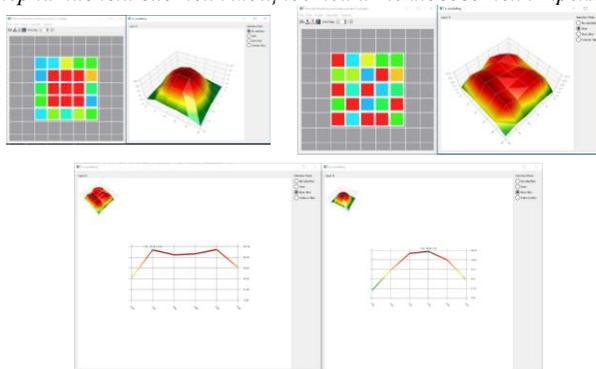


Рис. 13. Выравнивание теплового поля ИС путем применения эволюционного алгоритма

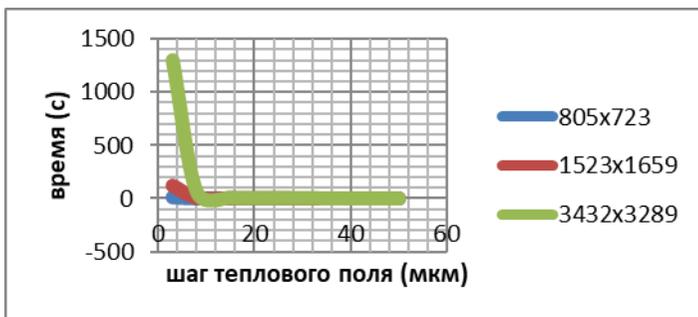


Рис. 14. Зависимость времени генерации теплового поля от шага дискретной сетки и площади размещения

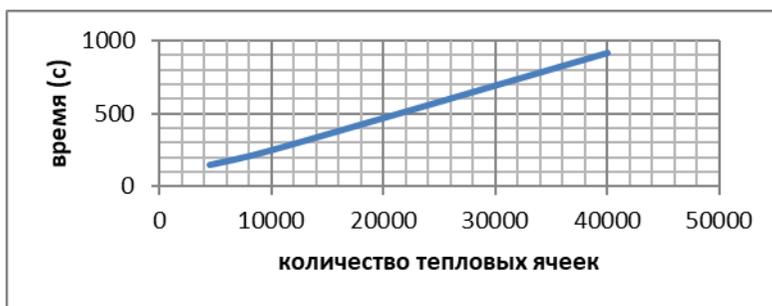


Рис. 15. Зависимость времени, затрачиваемого на расчет температурных уровней, от количества тепловых ячеек

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Обоснована важность вопросов моделирования и выравнивания теплового поля с точки зрения тепловой надежности при проектировании современных ИС [3, 4].
2. Разработаны автоматизированные методы динамического электротеплового моделирования для двумерных и трехмерных ИС, которые дают полное описание процесса формирования температуры. Разработанные электротепловые динамические модели были протестированы на реальных ИС и продемонстрировали полноту моделей на основе полученных результатов [1 - 3].
3. Разработаны эволюционные алгоритмы для автоматизированного теплового размещения элементов двумерных и трехмерных ИС, которые выравнивают всю площадь поверхности ИС, а не локальные области. Разработана программа для исследования эволюционных алгоритмов, с помощью которой тестовые исследования продемонстрировали эффективность предложенного алгоритма: выравнивание градиентов - от 23 до 32% в случае 10 тестовых двумерных ИС с разными размерами, но с равными подобластями в среднем за 4 итерации, и от 30 до 37% -выравнивание за 8 итераций для 10 тестовых ИС с одинаковыми размерами, но с подобластями разных размеров. Исследования 8 тестовых

трехмерных ИС показали выравнивание теплового поля от 25 до 35% в среднем за 12 итераций [4 - 6].

4. Разработана алгоритмическая структура моделирования и оптимизации теплового поля. Подробно рассмотрены алгоритмы, используемые в отдельных их сегментах, благодаря чему уровень сложности разработанных алгоритмов моделирования оценивается как $O(n \cdot \log(n))$ независимо от типа ИС.

5. Разработан маршрут автоматизированного проектирования с использованием средств моделирования и оптимизации.

6. На основе предложенных методов моделирования и выравнивания теплового поля ИС разработано автоматизированное программное средство ТМИС для обеспечения тепловой надежности, которое дает проектировщику возможность визуализации теплового поля ИС и выполнения выравнивания теплового поля как с помощью эволюционных алгоритмов, так и вручную. Скорость разработанного программного средства исследовалась в зависимости от размера и количества тепловых ячеек [1].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Gasparyan T.A. Thermal Filed Modeling and Thermal Map Creation of 3D Integrated Circuits // Proceedings of Engineering Academy of Armenia (PEAA). ISSN 1829-0045 -2018. -V.15, N1. -P. 137-142.

2. Gasparyan T.A. Thermal Field Modeling of Integrated Circuits // 18 ISPC “Modern information and electronic technologies” 22-26 May 2017, Odesa, Ukraine, 2017. -P. 44-45.

3. Հարույնյան Ա.Գ., Մարտիրոսյան Ա.Ռ., Հարույնյան Յ.Ժ., Գասպարյան Տ.Ա. Եռաչափի ինտեգրալ սխեմաների տարրերի ջերմային տեղաբաշխումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան: Ըարտարագետ, 2017.- Մաս 1. - էջ 283-288:

4. Gasparyan T., Harutyunyan A. Approach to matrix based thermal placement // Proceedings of the semiconductor micro & nanoelectronics 11th international conference. - Yerevan, Armenia, 2017. – P. 196-198.

5. Melikyan V.Sh., Harutyunyan A.G., Gasparyan T.A. Temperature-Aware Interactive Initial Placement for Integrated Circuits // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’17). - Novi Sad, Serbia, 2017. - P.34-37.

6. Գասպարյան Տ.Ա. Ինտեգրալ սխեմաների տարրերի ջերմային տեղաբաշխման էվոլյուցիոն ալգորիթմի մշակումը և հետազոտումը, //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. -2018. Յ. LXXI, N1 -էջ 62-70:

**ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ ՏԻԳՐԱՆ ԱՇՈՏԻ
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ
ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Համաձայան կիսահաղորդչային միջազգային տեխնոլոգիական ճանապարհային քարտեզի վերջին կանխատեսումների՝ ԻՍ-ների տրանզիստրոնների չափերը շարունակելու են նվազել ընդհուպ մինչ թունելային երևույթների առաջացումը: Բայց դա ևս չի կանգնեցնի դրանց հետագա փոքրացման գործընթացը, քանի որ ստեղծվում են նոր դասի տրանզիստրոններ, որոնք հենց օգտագործում են այդ երևույթները: Տրանզիստրոնների չափերի փոքրացմանը զուգընթաց, փոքրանում է դրանց սպառած հզորության ծավալները, բայց մեծանում է ինտեգրացիայի մակարդակը:

Ինտեգրման բարձր աստիճանի, մեծ արագագործության և փոքր էներգասպառման ապահովման նպատակով վերջին ավելի քան 40 տարվա ընթացքում ԻՍ-ի արտադրման կոմպլեմենտար մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ տեխնոլոգիաները ենթարկվել են մասշտաբավորման: Այդպիսի տեխնոլոգիական մասշտաբավորման տեմպերը շատ ավելի մեծ են, քան ԻՍ-երի բյուրեղի մակերեսի աճը: Արդյունքում մեծանում է միավոր մակերեսում տեղաբաշխված տարրերի թիվը: Անկախ այն փաստից, որ ժամանակակից ԻՍ-երում կիրառվող տրանզիստրոնների սպառող հզորությունը նվազել է, ինտեգրացիայի բարձր մակարդակը հանգեցրել է ԻՍ-երում բացարձակ էներգասպառման մակարդակի աճին: Էներգասպառման բարձր մակարդակները հանգեցնում են ԻՍ-երի աշխատանքային ջերմաստիճանների աճին, որը շրջակա միջավայրի 25°C ջերմաստիճանի պայմաններում՝ անգամ ամենաժամանակակից պատենավորման տեխնոլոգիաների կիրառման դեպքում, կարող է գերազանցել 100°C: ԻՍ-երի արագացված ռեժիմում փորձարկումների արդյունքում ստացվել են տվյալներ, համաձայն որոնց՝ կիսահաղորդչային հարթակի աշխատանքային ջերմաստիճանի 60°C-ից մինչև 125°C բարձրացման դեպքում ծառայության ժամկետը 50-75 տարուց իջնում է մինչև 1000-1500 ժամի:

Ժամանակակից դյուրակիր սարքերի լայն տարածմանը զուգընթաց սահմանափակվում էր ԻՍ-երի ջերմության ցրման ավանդական միջոցների կիրառումը: Այդպիսի ավանդական միջոցներից են հովացուցիչներից և ջերմացրիչներից կազմված համակարգերը: Բացի դյուրակիր սարքերից, ժամանակակից եռաչափ ինտեգրալ սխեմաներում ջերմության կենտրոնացած տիրույթների առկայությունը հնարավոր չէր լինի կոմպեսացնել ավանդական միջոցների կիրառմամբ:

Սրանք հանդիսանում են պատճառներից, որոնց հետևանքով կարևորվում է ջերմային հուսալիության տեսանկյունից ջերմային դաշտի մոդելավորման մեթոդների և համահարթեցման ալգորիթմների մշակումը:

Հետազոտության առարկան է ջերմաստիճանային բարձր մակարդակների ազդեցությունը ԻՍ-երի հուսալիության վրա: Դրանց կանխատեսման և լավարկման եղանակները:

Աշխատանքի նպատակն է ԻՍ-երի ջերմային հուսալիության բարձրացման նպատակով ջերմային դաշտի մոդելավորման եղանակների և համահարթեցման ալգորիթմների մշակումը և հետազոտումը: Դրանց օգտագործմամբ ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված նախագծման ծրագրային գործիքի ստեղծումը:

Հիմնավորվել է ժամանակակից ԻՍ-երի նախագծման մեջ, ջերմային հուսալիության տեսանկյունից, ջերմային դաշտի մոդելավորման և համահարթեցման խնդիրների կարևորությունը [3, 4]:

Մշակվել են երկչափ և եռաչափ ԻՍ-երի ջերմային դաշտի ավտոմատացված մոդելավորման դինամիկ ջերմաէլեկտրական նմանակման մեթոդներ, որոնց դինամիկ բնույթի շնորհիվ ապահովվում է ջերմաստիճանների մակարդակների ձևավորման գործընթացի լիարժեք նկարագրությունը: Մշակված դինամիկ մոդելներն ունեն առավելություններ ճշգրտության տեսանկյունից՝ համանման ստատիկ մոդելների հետ համեմատած: Մշակված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելները փորձարկվել են իրական ԻՍ-երի վրա և ցույց է տրվել մոդելների լիարժեքությունը ստացված արդյունքների հիման վրա [1, 2, 3]:

Մշակվել են երկաչափ և եռաչափ ԻՍ-երի տարրերի ջերմային տեղաբաշխման ավտոմատացված միջոցներ, հիմնված էվոլյուցիոն ալգորիթմների վրա, որոնք համահարթեցնում են ԻՍ-ի ամբողջ մակերեսը, այլ ոչ թե լոկալ տեղամասերը, սա իր հերթին բարձրացնում է ջերմային հուսալիության մակարդակը: Ներկայացված էվոլյուցիոն ալգորիթմների հետազոտման համար մշակվել է փորձնական հետազոտությունների համար նախատեսված ծրագրային միջոց, որի միջոցով կատարված փորձնական հետազոտությունները ցույց են տվել մշակված ալգորիթմի արդյունավետությունը՝ երկչափ ԻՍ-երի դեպքում 23...32%-ով ջերմային դաշտի համահարթեցում տարբեր չափերի 10 ԻՍ-երի և միևնույն չափի ենթամատրիցների դեպքում միջինում 4 իտերացիայի ընթացքում և 30...37%-ով համահարթեցում միևնույն չափի 10 ԻՍ-ի բայց տարբեր չափի ենթամատրիցների դեպքում միջինը 8 իտերացիայի դեպքում: Եռաչափ 8 ԻՍ-երի համար կատարված հետազոտությունները ցույց են տվել 25...35%-ով ջերմային դաշտի համահարթեցում միջինում 12 իտերացիայի ընթացքում [4, 5, 6]:

Մշակվել է ջերմային դաշտի մոդելավորման և լավարկման ալգորիթմական հենքը: Մանրամասն դիտարկվել են ալգորիթմների առանձին հատվածներում օգտագործող այլ ալգորիթմներ՝ իրենց բարդության մակարդակներով, որոնց շնորհիվ գնահատվել է մշակված մոդելավորման ալգորիթմների բարդությունը անկախ ԻՍ-ի մակարդակների քանակից՝ $O(n^* \log(n))$, որտեղ n -ը ԻՍ-ի տարրերի քանակն է:

Մշակվել է մոդելավորման և լավարկման միջոցների կիրառմամբ ավտոմատացված նախագծման երթուղի:

Մշակվել է առաջարկված ջերմաէլեկտրական դինամիկ մոդելների և ջերմային դաշտի համահարթեցման էվոլյուցիոն ալգորիթմների հիման վրա TMIC ջերմային հուսալիության բարձրացման ավտոմատացված ծրագրային գործիքը, այն հնարավորություն է ընձեռում նախագծողին պատկերացում կազմելու ԻՍ-ի ջերմային դաշտի մասին և կատարելու ջերմային դաշտի համահարթեցում ինչպես էվոլյուցիոն ալգորիթմների կիրառմամբ, այնպես էլ ձեռքով: Մշակված ծրագրային գործիքի արագագործությունը հետազոտվել է՝ կախված ջերմային բջիջների չափերից և քանակից [1]:

GASPARYAN TIGRAN ASHOT
DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASES AND TOOLS OF INITIAL
PLACEMENT OF ELEMENTS IN SUBMICRON DIGITAL INTEGRATED
CIRCUITS

SUMMARY

According to the latest forecast of the semiconductor international technology roadmap, the size of transistors will continue to diminish until tunneling occurs. But that does not stop the process of further downsizing, as new class transistors are created that use those phenomena. As the transistor diminishes, the power consumption decreases, but the level of integration increases.

Comprehensive metal-oxide-semiconductor technology for the production of high-end, high-speed and small power consumption over the past 40 years has been subject to scalability. Such technological scaling rates are much higher than the increase in the surface of the crystal. As a result, the number of items on the surface increases. Regardless of the fact that the current consumption of transistors used in the current IC has diminished, the high level of integration has led to an increase in absolute energy consumption. High levels of energy consumption result in an increase in the operating temperature of the ICs, at temperatures up to 25⁰C in the environment, even with the use of the most up-to-date patenting technology, may exceed 100⁰C. Accelerated testing of the IC shows that, in case of increasing the operating temperature of the semiconductor platform from 60⁰C to 125⁰C, the service life is reduced from 50 to 75 years to 1000-1500 hours.

With the introduction of modern portable devices, the traditional use of heat dissipation for the IC has been limited. Traditional methods include coolers and cooling systems. In addition to portable devices, the presence of heat-centric domains in modern three-dimensional integrated circuits would not be possible by conventional means.

These are the reasons why the development of heat field modeling techniques and the algorithms for leveling are important in terms of thermal reliability.

The subject of the study is the high degree of heat transfer efficiency on the IC. Their forecasting and optimization methods.

The purpose of the work is to develop and investigate thermal field modeling methods and algorithms for optimization of thermal reliability of ICs. Creating automated design software tools for thermal reliability.

It is based on the design of modern ICs, from the perspective of heat reliability, the importance of modeling and leveling of the heat field [3, 4].

Dynamic thermoelectric imaging automated techniques for two-dimensional and three-dimensional heat transfer modeling have been developed, with a dynamic character, providing a complete description of the temperature formation process. Developed dynamic models have advantages in terms of accuracy compared to similar static models. Developed thermoelectric dynamic models have been tested on real ICs and demonstrated the fullness of the models based on the results obtained [1, 2, 3].

Evolutionary algorithms for the automated thermal placement of two-dimensional and three-dimensional IC elements have been developed that level the entire surface area of the IC, not local areas, which in turn increases the thermal reliability. A program for investigating evolutionary algorithms was developed with the help of which test studies demonstrated the effectiveness of the developed algorithm: gradient equalization from 23 to 32% in the case of two-dimensional 10 testing ICs with different dimensions but with equal sub-regions on average for 4 iteration and from 30 to 37% alignment for 8 iteration, for 10 testing ICs with the same size, but with sub-areas of different sizes. Studies of 8 testing 3D ICs have shown from 25 to 35% of the equalization of the thermal field on average for 12 inertia [4, 5, 6].

The algorithmic structure of modeling and optimization of the thermal field is developed. Algorithms used in individual segments of algorithms were examined in detail, with their complexity levels, due to which the complexity of the developed modeling algorithms is estimated as $O(n \cdot \log(n))$ where n is the count of IC cells, regardless of the type of IC.

An automated route is designed using modeling and optimization tools which has been developed.

Based on the foregoing methods, simulation and smoothing of the thermal field of the IC the automated software tool TMIC was developed to ensure thermal reliability. It gives the designer the opportunity to visualize the thermal field of the IC and perform the alignment of the thermal field with both evolutionary algorithms and manually. The speed of the developed software tool was investigated depending on the size and number of thermal cells [1].

