

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І.І.МЕЧНИКОВА
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут математики, економіки та механіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра математичного забезпечення комп'ютерних систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Дипломна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему Дослідження та реалізація методів виявлення
дефектів мікролітографічних проектів
на основі нейромережових підходів

Research and implementation of methods
for detecting defects in microlithographical
projects on the basis of neural network approaches

Исследование и реализация методов выявления
дефектов микролитографических проектов
на основании нейросетевых подходов

Виконав: студент б курсу, групи 1
напряму підготовки (спеціальності)
6.050102 – Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Михаленко Владислав Володимирович
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доц. Пенко В.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент д.т.н., проф. Гунченко Ю. О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. Зоріло В. В.
(прізвище та ініціали)

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
№ від « » р.

Завідувач кафедри

Є.В. Малахов
(підпис) (прізвище, ініціали)

Захищено на засіданні ЕК №
протокол № від « » р.

Оцінка

(за 4-х бальною шкалою, за шкалою ECTS, бал.)

Голова ЕК

О.О. Арсірій
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена розробці програмних засобів на тему «Дослідження та реалізація методів виявлення дефектів мікролітографічних проектів на основі нейромережових підходів».

Мета роботи – розробка та реалізація підходу для виявлення та класифікації дефектних областей в мікролітографічних проектних рішеннях.

Об'єктом дослідження в межах даної роботи є мікролітографічні проекти у форматі GDSII з розміщеною в них графічною інформацією.

Предмет дослідження – дефекти, що виникають у процесі виготовлення мікрочіпів, а саме експонування маски на напівпровідникову підкладку.

У результаті роботи було розроблено програмні модулі, що реалізують витягнення попередньо виділених у GDSII файлі дефектних областей, спрощену симуляцію процесу мікролітографії та кодування змісту GDSII-проектів у вигляді спеціалізованих структур – супер-пікселів. На базі отриманих результатів було проведено суб'єктивну класифікацію критичних областей і побудовано навчальну вибірку для згорткового нейромережового класифікатору.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена разработке программных средств по теме «Исследование и реализация методов выявления дефектов микролитографических проектов на основании нейросетевых подходов».

Цель работы – разработка и реализация подхода для выявления и классификации дефектных областей в микролитографических проектных решениях.

Объектом исследования в пределах данной работы являются микролитографические проекты в формате GDSII с помещенной в них графической информацией.

Предмет исследования – дефекты, которые возникают в процессе изготовления микрочипов, а именно экспонирования маски на полупроводниковую подложку.

В результате дипломной работы были разработаны программные модули, которые реализуют извлечение предварительно выделенных в GDSII файлах дефектных областей, упрощенную симуляцию процесса микролитографии и кодирование содержимого GDSII-проектов в виде специализированных структур – супер-пикселей. На базе полученных результатов была произведена субъективная классификация критических областей и построена обучающая выборка для сверточного нейросетевого классификатора.

ABSTRACT

Diploma work is devoted to the development of software tools for the topic "Research and implementation of methods for detecting defects in microlithographical projects on the basis of neural network approaches".

The purpose of the work is to develop and implement an approach for defective areas detection and classification in microlithographic design solutions.

The object of the research are micro-lithographic projects in GDSII format with the graphic information placed in them.

The subject of the research are defects that arise in microchips manufacturing process, particularly during the mask exponation on the semiconductor wafer.

As a result of the work, software modules were developed that implement: defective areas extraction that were previously marked in GDSII file; simplified simulation of the microlitography process (based on Gaussian blur); GDSII projects content encoding in the form of specialized structures - super-pixels. On the basis of the obtained results, critical areas subjective classification was conducted and a learning sample was constructed for a convolutional neural classifier.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 ВВЕДЕННЯ ДО ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	10
1.1 Процес мікролітографії	10
1.1.1 Дефектні області (hotspot) в МЛ-проектах	11
1.1.2 Аналіз та виявлення hotspot	12
1.1.3 Формат представлення МЛ-проектів у цифровому вигляді	14
1.2 Огляд існуючих рішень для виявлення hotspot	14
1.2.1 Симуляція процесу мікролітографії	15
1.2.2 Напрямок Pattern Matching	16
1.2.3 Machine Learning метод з витягненням критичних ознак	17
1.2.4 Machine Learning - метод EPIC	20
1.3 Постановка задачі	26
2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ	27
2.1 Сканування та кодування початкових даних	27
2.1.1 Проектування підготовки даних	28
2.1.2 Проектування процесу кодування	29
2.2 Моделювання симуляції дії джерела випромінювання	30
2.3 Проектування роботи нейромережевого класифікатора	32
2.3.1 Поняття нейрону	33
2.3.2 Операція згортки	35
2.3.3 Архітектурні особливості та структура ЗНМ	35
3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТА ВИБІР ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ..	38
3.1 Вибір інструментів для розробки	38
3.1.1 C++ та Qt	38
3.1.2 Python – Theano, Numpy	39
3.2 Реалізація процесу сканування hotspot за маркерами	40
3.2.1 Геометричні примітиви	40
3.2.2 Геометричний аналізатор	41

3.2.3 Реалізація сканеру hotspot	45
3.2.4 Перенесення інформації на зображення	47
3.3 Реалізація процесу симуляції мікролітографії	47
3.3.1 Ядро Гауса	48
3.3.2 Поле інтенсивності	49
3.3.3 Літографічний промінь	50
3.3.4 Гаусовий симулятор	50
3.4 Реалізація процесу кодування	52
3.4.1 Супер-піксель	52
3.4.2 Процес кодування	53
3.4.3 Валідація процесу кодування	56
3.5 Реалізація нейронної мережі	58
3.5.1 Підготовка вхідних даних	59
3.5.2 Реалізація мережі	60
3.5.3 Реалізація шарів мережі	60
4 РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ СИСТЕМИ	62
4.1 Результати витягнення hotspot з GDSII-файлу	62
4.2 Результати симуляції процесу мікролітографії	62
4.3 Результат кодування hotspot	64
4.4 Результати роботи згорткової нейронної мережі	66
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70
ДОДАТОК А РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ СКАНЕРУ GDSII-ФАЙЛІВ	72
ДОДАТОК Б РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СКАНУВАННЯ	73
ДОДАТОК В РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ СИМУЛЯЦІЇ МІКРОЛІТОГРАФІЇ ..	76
ДОДАТОК Г РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ	78
ДОДАТОК Д РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДГОТОВКИ ДАНИХ ДЛЯ МЕРЕЖІ	80

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

ЗНМ – згорткова нейронна мережа (Convolutional neural network).

ІС – інтегральна схема, електронна схема, яку виготовлено на кристалі і розміщено на напівпровідниковій підкладці.

МЛ – мікролітографічний.

НМ – нейронна мережа

ПН – проектна норма, характеристика будь-якої ІС, мінімальна відстань між схемотехнічними елементами мікрочіпу, при якій мікрочіп зберігає допустиму працездатність.

CF – critical feature, критична ознака, визначення, що використовується в методиці Machine Learning based Lithographic Hotspot Detection with Critical-Feature Extraction and Classification. Стислий опис області МЛ-проекту зі збереженням усієї інформації. Використовується у якості вхідних даних у процесі машинного навчання.

DP – Double Patterning, один із методів спрямованих на підвищення якості перенесення шаблонів на напівпровідник. Основна ідея полягає у використанні пари масок, у результаті експонування яких зберігаються кутові області на нанесених МЛ-проектах.

Hotspot (HS) – критична область, місце на ІС, в якому порушується логіка функціонування мікрочіпу. Причиною виникнення дефектів є поява браку в процесі обробки напівпровідника оптичним мікролітографічним інструментом.

OPC - Optical Proximity Correction, один з методів спрямованих на корегування інформації, що зберігається в МЛ-проектах: змінюється геометрична інформація про зовнішній вигляд елементів МЛ-проекту, які знаходяться на досить близькій відстані один від одного.

ВСТУП

Мікročіпи є базою практично для всієї електроніки, що використовується в повсякденному житті. Сучасний чіп представляє собою електронну схему довільної складності, яку розміщують на напівпровідниковій основі (підкладці). Однією з основних технологій, що використовуються у виготовленні ІС є оптична мікролітографія: процес формування контактних доріжок, у які надалі розміщуються схемотехнічні елементи. Проектна норма в мікročіпах останніх поколінь складає 7-20 нм: проміжки між елементами мікročіпу вже не піддаються ефективному аналізу людським оком.

Індустрія виготовлення чіпів максимально наблизилася до граничних можливостей інструментів, які активно використовуються на даний момент. Це призводить до росту кількості браку у вихідній продукції: як наслідок, спостерігається зростання матеріальних, ресурсних та часових витрат. Джерелом дефектів (hotspot) є базовий інструмент оптичної мікролітографії – світло. Воно проявляє невизначеність у процесі нанесення зображень через дуже близьке розташування контурів елементів на ІС.

Зусилля для вирішення даної проблеми сконцентровані на етапі проектування майбутнього мікročіпу: цей підхід є простим за своєю природою, якщо порівнювати з розробкою і пошуком нового способу обробки напівпровідника при створенні ІС. Існують декілька методів, які дозволяють видозмінювати і корегувати проектні маски. Це дає позитивні результати, але при цьому задача пошуку областей для внесення коректив залишається актуальною. Попередній аналіз проектного рішення дозволить уникнути небажаного функціонування ІС. У світі представлено невелику кількість програмних рішень, які виявляють потенційні проблемні області: окрім досить непоганих результатів кожен з них має свої недоліки, які гіпотетично можна виправити, або принаймні, покращити. Зокрема розмірність даних, з якими проводяться маніпуляції потребує стиснення.

Об'єктом дослідження в межах даної роботи є МЛ-проекти з розміщеною в них графічною інформацією.

Предмет дослідження – дефекти, що виникають у процесі виготовлення ІС: експонування маски на напівпровідникову підкладку.

Мета даної роботи полягає в розробці та реалізації підходу для виявлення та класифікації дефектних областей в МЛ-проектних рішеннях. Для її досягнення необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) ознайомитися з особливостями процесу мікролітографії;
- 2) ознайомитися з існуючими рішеннями проблеми виявлення і класифікації дефектів на ІС;
- 3) розробити засоби для ефективною інтерпретації геометричної інформації GDSII-файлів;
- 4) реалізація моделі симуляції процесу мікролітографії для виявлення його наслідків: з точки зору дефектів;
- 5) експертна класифікація типів дефектів базуючись на результатах симуляції;
- 6) реалізація компактного кодування топології МЛ-дизайну для представлення формування навчальної вибірки для нейронної мережі;
- 7) побудова згорткової нейронної мережі для навчання з використанням отриманої навчальної вибірки;
- 8) оцінка ефективності нейромережевої класифікації.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання даної дипломної роботи було спроектовано та реалізовано програмні інструменти, що є складовою системи виявлення дефектів мікролітографії. Було вирішено наступні задачі:

- реалізовано витягнення та інтерпретацію геометричної інформації про дефектні області, які були попередньо виділені маркерами в межах GDSII-файлу;
- реалізовано інструмент спрощеної симуляції процесу мікролітографії на базі Гаусового розмиття;
- реалізовано конвертацію витягнутої та симульованої інформації в jpeg-файли;
- реалізовано інструмент для кодування вмісту GDSII-файлу у вигляді спеціалізованої структури – двовимірного масиву супер-пікселів;
- відштовхуючись від результатів симуляції було проведено суб'єктивну експертну класифікацію hotspot;
- реалізовано конвертацію закодованої інформації у вигляді навчальної вибірки для згорткового нейромережевого класифікатора;
- перевірено можливість використання інтерпретованих даних для навчання прогнозуючої моделі.

Для перевірки роботи системи використовувався GDSII-файл з наявними в ньому прикладами hotspot. Процес симуляції та кодування проходить відповідно поставленим вимогам. Результати роботи згорткової мережі потребують покращення: складність кластеризації шаблонів з наявної навчальної множини hotspot та їх невелика кількість призвели до невисокої точності роботи мережі. Ключовим фактором, який вплинув на точність, став високий рівень суб'єктивності у процесі розбиття на класи наявної множини

прикладів дефектних областей. Незважаючи на поточні результати прогнозуючої моделі, запропонований підхід до виявлення hotspot може дати кращі результати при залученні додаткової експертизи для виділення класів дефектних областей. Серед перспектив і можливостей розвитку реалізованої системи можна виділити:

- оптимізація роботи алгоритму кодування та розширення для роботи не тільки з ортогональною інформацією;
- інтеграція можливості виконання скриптів на мові Python задля забезпечення нерозривності процесу підготовки закодованих даних;
- проведення тестування роботи системи на більш широкій навчальній вибірці;
- модифікація топології згорткової мережі з метою забезпечення виявлення додаткових ознак у процесі навчання;
- отримані інструменти можуть бути використані для топологічного і більш детального аналізу критичних областей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Smith, Bruce W., and Kazuaki Suzuki, eds. *Microlithography: science and technology*. Vol. 126. CRC press, 2007. – 864 p.;
2. Mark A. McCord, Stanford University Michael J. Rooks, Cornell University SPIE Handbook of Microlithography: Micromachining and Microfabrication Institution Of Engineering And Technology (January 1, 1997) – 776 p.;
3. William Andrew, Handbook of VLSI Microlithography: January 1991 – 671 p.;
4. GDSII Stream Format Manual Documentation №B97E060, Release 6.0, February 1987, Calma – 47 p.;
5. Physical Verification with Calibre ® [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/verification-signoff/physical-verification. – 20.06.2018;
6. Real virtual patterning [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.kla-tencor.com/Lithography-Software/chip-prolith.html>. – 20.06.2018;
7. Optical lithography - OPC [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.compugraphics-photomasks.com/our-capabilities/opcphase-shift/> - 20.06.2018;
8. Duo Ding, Xiang Wu, Joydeep Ghosh, David Z., Machine Learning based Lithographic Hotspot Detection with Critical-Feature Extraction and Classification IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology, Dec 1 2009 - 219-222 pages – 20.06.2018;
9. Duo Ding EPIC: Efficient Prediction of IC Manufacturing Hotspots With a Unified Meta-Classification Formulation - 17th Asia and South Pacific Design Automation Conference Jan. 30 2012-Feb. 2 2012 – 20.06.2018;
10. Как работает сверточная нейронная сеть [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/glubokaya-svertochnaja-nejronnaja-set/> - 10.09.2018;

- 11.Сверточная нейронная сеть, часть 1: структура, топология, функции активации и обучающее множество. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://habr.com/post/348000/> - 11.09.2018;
- 12.A Beginner's Guide to Convolutional Neural Networks (CNNs). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://skymind.ai/wiki/convolutional-network> - 12.09.2018;
- 13.How To Teach A Computer To See With Convolutional Neural Networks [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/how-to-teach-a-computer-to-see-with-convolutional-neural-networks-96c120827cd1> - 20.09.2018;
- 14.Профессиональный информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru> – 25.09.2018;
- 15.Qt Framework - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.qt.io/developers/> - 15.11.2017;
- 16.Numpy and Scipy Documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.scipy.org/doc/> - 15.10.2018;
- 17.Theano Docs [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://deeplearning.net> – 15.10.2018;
- 18.Михаленко В.В., Програмні засоби підтримки процесу мікролітографії / В. В. Михаленко, В. Г. Пенко // Тези доповідей IV всеукраїнської конференції студентів і молодих науковців "Інформатика, інформаційні системи та технології". - Одеса, 2017. - 200 с.;
- 19.Neural Networks and Deep Learning is a free online book. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/> - 16.10.2018;