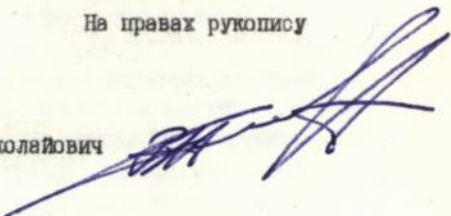


На правах рукопису

ТЕСЛЮК Василь Миколайович



УДК 621.382.002

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ШАРІВ ІС В ПРИЛАДО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ САПР

Спеціальність: 05.13.05. - Системи автоматизації проектування

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі
"ваня" Державного університету "Л

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор
В.О.Коваль

Науковий консультант: кандидат технічних наук, доцент
П.П.Гранат

Офіційні опоненти : доктор фізико-математичних наук, професор
Савицький Вадим Григорович
кандидат технічних наук, доцент
Романишин Юрій Михайлович

Провідне підприємство : ВО "Пілярон", м.Львів

Захист дисертації відбудеться 28 червня 1995 року в 14⁰⁰ годин на засіданні спеціалізованої ради КО4.06.06 при Державному університеті "Львівська політехніка" за адресою 290646, м.Львів-13, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці університету за адресою: 290646, м.Львів, вул.Професорська 1.

Автореферат розісланий "22" Травня 1995 року.

ЛНБ ім. В. Стефаніка.
АН України

Вчений секретар
спеціалізованої ради
К.Т.Н.

С.П.Ткаченко

Актуальність проблеми. Програма електронізації народного господарства передбачає вирішення задачі створення сучасних засобів обчислювальної техніки та систем автоматизованого проектування (САПР) з розвинутим програмним забезпеченням для широкого насичення галузей народного господарства, науково-дослідних та конструкторських організацій. Системи автоматизованого проектування є особливо актуальними при проектуванні складних об'єктів, якими є мікроелектронні пристрої, і в першу чергу напівпровідникові інтегральні схеми (ІС).

Тенденції мікромініатюризації породжують проблеми пов'язані зі зменшенням геометричних розмірів елементів ІС і досягнення низької вартості виготовлення кристалів за рахунок більш якісного проектування та зниження затрат на технологічну підготовку виробництва. Тому на етапах проектування і технологічної підготовки виробництва необхідно використовувати засоби САПР, особливо математичного моделювання.

Технологія виготовлення ІС постійно вдосконалюється і на сьогоднішній день дозволила досягнути високої ступені інтеграції (порядку 10^6 - 10^7 активних елементів на кристал). В таких умовах виникають нові проблеми при створенні САПР напівпровідникових ІС.

Існуючі підходи та математичні моделі опису фізичних процесів в напівпровідникових структурах і особливо при аналізі технології виготовлення ІС, не задовільняють вимогам сьогоднішнього часу. Ці моделі не враховують особливостей технологічного середовища, процесів в обладнанні та на поверхні кремнієвих пластин і потребують нових підходів до побудови алгоритмів машинного моделювання, модифікації існуючих та розробки нових математичних моделей.

Однією з великих перешкод збільшення ступені інтеграції є велика площа міжелементної ізоляції. Двовимірне моделювання технологічних процесів і всієї напівпровідникової структури дозволяє не лише підвищити точність розрахунку вихідних контрольованих параметрів фізичної структури, враховувати двовимірні ефекти для оцінки характеристик виробу, але й ефективно використовувати корисну площу кристалу, оптимальніше розмістити компоненти ІС на робочому полі.

Використання нових технологій, які забезпечують малі глибини залягання р-р переходів, вимагають більш детального вивчення ефектів на поверхні кристалу та в технологічному обладнанні. Підвищити точність моделювання та вивчити впливи умов зовнішнього середовища на параметри ІС можливо лише при більш детальному розгляді техноло-

гічних операцій, розбитті їх на окремі технологічні переходи.

В умовах зростання багатоваріантності технологічних рішень ускладнились математичні моделі, що утруднює, з використанням сучасних машинних ресурсів, побудову моделі всього технологічного процесу формування напівпровідникової ІС. Зняти цю проблему можна лише розробкою ефективних алгоритмів моделювання, окремих технологічних переходів, операцій, типових груп операцій і базових процесів виготовлення мікроелектронних пристроїв.

Метод дисертаційної роботи є розробка математичних моделей, методики та алгоритмів моделювання технологічних процесів виробництва ІС, для задач автоматизованого проектування напівпровідникових виробів і оцінки їх технологічності в рамках існуючих приладо-технологічних САПР, які орієнтовані на підвищення рівня виходу придатних та зниження собівартості мікроелектронних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Створити об'єднану модель об'єкту проектування і процесу виробництва у вигляді ієрархічної фізико-технологічної моделі ІС.
2. Розробити алгоритми моделювання технологічних процесів, які забезпечують послідовність формування відповідних областей напівпровідникового кристалу і дозволяють аналізувати фазові перетворення в обладнанні, кристалі та на його поверхні.
3. Розробити і реалізувати математичні моделі аналізу процесів газодинаміки та термодинаміки в технологічному обладнанні для визначення впливів зовнішнього середовища на поверхню кремнієвих пластин.
4. Розробити і реалізувати математичні моделі технологічних процесів дифузії, іонного легування, окислення і росту епітаксійних плівок, які вживають фазові перетворення в кристалі при проведенні технологічних операцій та проходженні всього маршруту формування ІС.
5. Дослідити та проаналізувати розроблені математичні моделі з метою оцінки їх ефективності використання, точності та адекватності в процесі проектування ІС.
6. Створити програмно-методичний комплекс аналізу дифузійних процесів в приладо-технологічних САПР на базі інформаційного, математичного, лінгвістичного і програмного забезпечення.

Методи досліджень включають методи системного аналізу, апарат математичної статистики, математичного моделювання, математичної фізики і обчислювальної математики, методи прикладного і системного

програмування.

На захист вносяться наступні основні положення:

1. Методика та алгоритми моделювання процесів виготовлення ІС, які дозволяють проводити декомпозицію технологічних процесів, груп технологічних операцій на окремі операції і переходи, структурувати математичні моделі з метою ефективного моделювання та аналізу процесів в обладнанні, на поверхні та в середині кремнієвих пластин.
2. Математичні моделі дифузійних технологічних переходів: "загонка через окисел постійної товщини"; "загонка з окисленням"; "форсаж"; "охолодження"; "витримка" та "підзагонки" домішок з твердих дифузантив при "форсажі", що дозволяє враховувати особливості технологічних рішень в процесі проектування ІС.
3. Математична модель окислення кремнію з врахуванням витрат кисню, математична модель зміни температури в середині дифузійної труби при "форсажі", "охолодженні" та "витримці" та математична модель залежності поверхневої концентрації від витрат газів-носіїв, кисню та газу-носія через джерело, що дає можливість зв'язати контрольовані параметри ІС з режимами виготовлення, процесами в обладнанні та якістю матеріалів.
4. Математична модель рельєфу поверхні для біполярних та метал-окисел-напівпровідник структур, яка враховує зміну поверхні кремнієвих пластин при проведенні технологічного маршруту.
5. Програмно-методичний комплекс моделювання технологічних процесів виготовлення ІС "ПроМІС-Т" (Програма Моделювання Інтегральних Схем - Технологія).

Наукова новизна роботи:

1. На основі системного підходу запропонований та розроблений алгоритм моделювання технологічних процесів виготовлення ІС, який відрізняється від існуючих врахуванням процесів в обладнанні.
2. Запропонована і розроблена бібліотека математичних моделей технологічних переходів та система управління бібліотекою моделей, що дозволяє ефективно формувати послідовно-неперервний процес розрахунку технологічного маршруту виготовлення ІС.
3. Розроблені та реалізовані в ПМК "ПроМІС-Т" нові дифузійні математичні моделі ("загонка через окисел постійної товщини" і "загонка з окисленням"), які дозволили підвищити точність розрахунку вихідних контрольованих параметрів технологічного процесу.
4. Розроблені та реалізовані математична модель (ММ) окислення кремнію з врахуванням витрат кисню, ММ зміни температури в середині дифузійної труби при "форсажі", "охолодженні" і "витримці" та ММ

залежності поверхневої концентрації від витрат газів-носіїв, кисню та газу-носія через джерело. Отримані ММ дозволили зв'язати характеристики обладнання і процеси в обладнанні з вихідними параметрами технологічних операцій.

5. Розроблені та реалізовані дифузійні математичні моделі технологічних переходів "форсаж", "охладження" "витримка" та "підзагонки" домішок з твердих дифузентів при "форсажі". Побудовані моделі переходів дозволяють підвищити точність моделювання дифузійних процесів, сформувати математичну модель повного циклу проведення дифузії при формуванні напівпровідникових ІС, зв'язати характеристики ІС з температурними процесами в обладнанні, прослідкувати характер впливу технологічних переходів на профілі розподілу легуючих домішок в кристалі.

6. Розроблена і реалізована математична модель рельєфу поверхні напівпровідникової структури, яка дозволяє в процесі проходження технологічного маршруту визначати та аналізувати зміщення поверхні пластини в різних напівпровідникових областях елементів ІС та підвищити точність розрахунку контрольованих параметрів фізичної структури.

7. Розроблені та реалізовані алгоритми для ефективного моделювання технологічних операцій, алгоритми розв'язку чисельних задач дифузії та методика моделювання технологічного процесу виготовлення ІС, що практично реалізовано в програмно-методичному комплексі "ПроМІС-Т".

Практична цінність роботи :

1. Розроблені та реалізовані алгоритми моделювання технологічних процесів виготовлення ІС, які дозволяють аналізувати процеси в обладнанні, на поверхні і в середині кремнієвих пластин.

2. Розроблена та реалізована бібліотека математичних моделей технологічних переходів, що забезпечує формування нових технологічних маршрутів, ефективно використовувати математичні моделі для забезпечення необхідної точності моделювання при заданих ресурсах обчислювальної техніки.

3. Розроблені нові та адаптовані відомі математичні моделі технологічних переходів і операцій, які описують фізичні процеси в кремнієвих структурах, що дозволяє оцінити ефективність технологічних рішень та забезпечити функціональну відтвореність виробів.

4. Розроблені ефективні алгоритми моделювання технологічних переходів, операцій, шарів та всього маршруту виготовлення ІС, які забезпечують поетапне формування напівпровідникових структур і оцінку характеристик виробів на рівнях операційного, мікроопераційного і

заклічного тестових контролів.

5. Розроблена математична модель зміни рельєфу поверхні напівпровідникових структур в процесі формування компонентів ІС дозволила точніше розрахувати контрольовані характеристики пристроїв.

6. Реалізовано і досліджено метод скінченних різниць для одновимірних та метод змінних напрямків для двовимірних задач дифузійних процесів у кремнієвих структурах.

7. Розроблений ПМК "ПроМІС-Т", який об'єднує математичні моделі, методику і алгоритм технологічного проектування ІС.

Реалізація результатів роботи. Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи використовувалися в сумісних науково-дослідних та проектно-конструкторських роботах, що проводяться в АТ "Родон" (м.Івано-Франківськ), СКТЕ "Орізон" (м.Івано-Франківськ), ВО "Полярон" (м.Львів), а також в навчальному процесі кафедри САПР по курсах "Інтегровані САПР великих інтегральних схем" та "Автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва".

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: Міждержавній науково-технічній конференції "Досвід розробки та застосування приладотехнологічних САПР в мікроелектроніці" (лютий 1983, 1985р., Львів); Всесоюзній нараді-семинарі "Высокие технологии в проектировании технических устройств и автоматизированных систем" (вересень 1983р., Воронеж); Науково-технічній конференції "Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств" (вересень 1983р., Бердянськ); Міждержавних науково-технічній конференції "Сучасні проблеми розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів" (лютий 1984р., Львів); конференціях і семінарах професорсько-викладацького складу Державного університету "Львівська політехніка" в 1982 - 1985 рр.

В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на кафедрі "Системи автоматизованого проектування" Державного університету "Львівська політехніка".

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи відображені в чотирнадцяти друкованих працях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота займає 150 сторінок машинописного тексту, і складається із вступу, п'яти розділів, заключення, списку літератури та додатків. Робота містить 73 рисунки, 24 таблиці. Бібліографічний список складається із 104 назв.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність та важливість питань, які розглядаються в дисертаційній роботі, визначена мета і задачі дослідження, сформульовані основні наукові положення, які вносяться на захист та практична цінність роботи.

В першому розділі проведений аналіз технологічних задач на всіх рівнях і стадіях проектування напівпровідникових інтегральних схем, визначені основні етапи технологічного проектування, що дозволяє показати їх місце в загальній структурі та обґрунтувати необхідність побудови автоматизованої системи аналізу і оцінки технологічності пристроїв.

Запропонована та обґрунтована методика ієрархічного підходу до задач технологічного проектування ІС, яка визначає етапи розробки маршруту технологічного процесу, розвитку його на технологічні шари, операції і переходи.

Розроблена та розвинута наскрізна фізико-технологічна модель ІС, яка дозволяє розраховувати конструкторсько-технологічні та функціональні параметри елементів і виробу в цілому.

Розроблений алгоритм моделювання технологічних процесів на основі базових маршрутів формування напівпровідникових структур і режимів проведення окремих технологічних операцій та переходів, особливостями яких є аналіз процесів в технологічному обладнанні та в напівпровідниковому кристалі. Особливістю цього алгоритму є врахування основних стадій формування напівпровідникової структури з аналізом фазових перетворень в кристалі і технологічному обладнанні, що дозволяє функціонально зв'язати контролючі параметри ІС з режимами виготовлення, параметрами обладнання і якістю використаних матеріалів.

Запропоноване і розроблена структура бібліотеки математичних моделей технологічних переходів, яка об'єднує математичні методи (скінченних різниць, кінцевих елементів, граничних елементів, Монте-Карло), моделі, початкові і межові умови, що дозволяє ефективно формувати технологічні маршрути, аналізувати необхідні ефекти (кластеризації домішок, прискорення коефіцієнта дифузії в окисному середовищі, взаємодії домішок різного типу через електростатичний потенціал, видавлення бази фосфором емітерної області, звуження ширини забороненої зони при високих концентраціях домішок та ін.), керувати точністю обчислювального процесу, нарощувати функціональні

можливості програмно-методичного комплексу. Система управління бібліотекою моделей визначає методи розв'язку і мірність задачі, правильність використання моделей, що пояснюють фізику процесу, автоматичну генерацію ефективних шляхів проведення розрахунків, що дає змогу при заданій точності моделювання, оптимально використати ресурси обчислювальної техніки і час розв'язку задачі.

Другий розділ присвячений розробці математичних моделей дифузійних процесів в якому розглянуті та адаптовані феноменологічні моделі дифузійних процесів в напівпровідникових структурах, які дозволяють сформулювати основні групи математичних моделей в бібліотечі математичних моделей технологічних переходів на фізичному рівні. Досліджено та визначено місце використання цих моделей при формуванні різних дифузійних областей в кремнієвих пластинах, побудовано евристичні правила врахування ефектів кластеризації і взаємодії домішок через електростатичний потенціал при моделюванні біполярних технологічних процесів.

Адаптовані відомі чисельні дифузійні моделі ("загонка", "розгонка", "розгонка з окисленням" і "розгонка під окислом постійної товщини") та розроблені нові ("загонка через окисел постійної товщини", "загонка з окисленням"). В загальному випадку нові дифузійні математичні моделі (ММ) описуються наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_{ox} h \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D_{ox} h \frac{\partial C}{\partial y} \right\}, \text{ при } C(x, y, t) \in R_{SiO_2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_{Si} \left[h \frac{\partial C}{\partial x} - (h-1) \frac{\partial N}{\partial x} \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D_{Si} \left[h \frac{\partial C}{\partial y} - (h-1) \frac{\partial N}{\partial y} \right] \right\},$$

якщо $C(x, y, t) \in R_{Si};$ (2)

з початковим умовам

$$C(x, y, 0) = C(x, y) \quad (3)$$

та межовими умовами для "загонки" з окисленням

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = \nu_3 C_{SiO_2} - C_1, \text{ при } C(x, y, t) \in SiO_2\text{-газ і } 0 \leq y \leq w; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = 0, \text{ при } C(x, y, t) \in SiO_2\text{-газ і } w \leq y \leq L_y; \quad (5)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = 0, \text{ при } 0 \leq y \leq L_y; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C(x, 0, t)}{\partial y} = 0, \text{ при } 0 \leq x \leq L_x; \quad (7)$$

$$\frac{\partial C(x, L_y, t)}{\partial y} = 0, \text{ при } 0 \leq x \leq L_x; \quad (8)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = \tau C_{SiO_2} - C_{Si}(\infty), \text{ при } C(x, y, t) \in SiO_2\text{-Si}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} = \eta C_{J_{Ox}} - C_{J_{Si}} / m, \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si; \quad (10)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} = -v_{Ox} C_{i_{Si}} - \alpha C_{i_{Ox}}, \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si; \quad (11)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} = -v_{Ox} C_{J_{Si}} - \alpha C_{J_{Ox}}, \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si. \quad (12)$$

де C - концентрація домішки; x і y - просторові координати; D_{Ox} - коефіцієнт дифузії в окислі; D_{Si} - коефіцієнт дифузії в кремнії; R_{SiO_2} - область окислу; R_{Si} - область кремнію; N - електрично-активна концентрація домішки; v_{Ox} - константа масопереносу на границі газ-окисел кремнію; η - коефіцієнт масопереносу на границі розділу SiO_2-Si ; m - рівноважний коефіцієнт сегрегації; L_x - максимальна величина координати X ; L_y - максимальна величина координати Y ; C_{SiO_2} - поверхнева концентрація домішки на поверхні SiO_2 ; w - ширини вікна; v_{Ox} - швидкість окислення кремнію; $C_{i_{Ox}}, C_{J_{Ox}}$ - концентрація домішки на границі SiO_2-Si в окислі, а $C_{J_{Si}}, C_{i_{Si}}$ - в кремнії, відповідно; $\alpha = 0.44$.

Для "загонки" через окисел постійної товщини межові умови (11 - 12) відсутні.

Побудовані дифузійні ММ дозволили врахувати фазові перетворення на поверхні і в середині пластин, більш точно описати дифузійні процеси при формуванні ІС, відобразити і пояснити зміну залежності характеристик фізичної структури від особливостей технологічних рішень.

Проведені експериментальні дослідження дифузійних технологічних переходів "завантаження", "форсажу", "оходження" і "витримки", які показали характер зміни температури в робочій зоні технологічного обладнання. З отриманих результатів слідує, що зміну температури в дифузійній печі при "форсажі" та "оходженні" можна апроксимувати наступними співвідношеннями:

$$T_f(t) = T_x + \frac{3(T_{Pr} - T_x)t}{t_f}, \quad \text{якщо } 0 \leq t \leq t_f/3; \quad (13)$$

$$T_f(t) = T_{Pr}, \quad \text{якщо } t_f/3 \leq t \leq t_f; \quad (14)$$

$$T_{Ox}(t) = T_{Pr} - \frac{(T_{Pr} - T_{Ox})t}{t_{Ox}}, \quad (15)$$

де T_x, T_{Pr}, T_{Ox} - температури "завантаження", процесу та "вивантаження" відповідно; $T_f(t), T_{Ox}(t)$ - закони зміни температури при "форсажі" та "оходженні"; t_f, t_{Ox} - час "форсажу" та "оходження"; t - біжуче значення часу.

Отримані апроксимації дозволили побудувати математичні моделі технологічних переходів "форсажу", "оходження" "витримки" та "підзагонки" домішок з твердих дифузантив при "форсажі". В інертно-

му середовищі кожна ММ описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} \right\} + \frac{q}{kT} [DN \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial x}] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} \right\} + \frac{q}{kT} [DN \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial y}] \quad (16)$$

з початковими умовами для розподілу температури та концентрації:

$$C(x, y, 0) = C(x, y), \quad (17)$$

$$T(x, y, 0) = T(x, y). \quad (18)$$

та межовими умовами:

$$\frac{\partial C(0, y, t)}{\partial x} = v(C_1 - C_0), \quad \text{при } 0 \leq y \leq w; \quad (19)$$

$$\frac{\partial C(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \text{при } w < y \leq L_y; \quad (20)$$

$$\frac{\partial C(x, 0, t)}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 < x < L_x; \quad (21)$$

$$\frac{\partial C(x, L_y, t)}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 < x < L_x; \quad (22)$$

$$T(0, y, t) = T(y, t), \quad \text{при } 0 < y < L_y; \quad (23)$$

$$\frac{\partial C(L_x, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \text{при } 0 < y \leq L_y, \quad (24)$$

де $T(y, t)$ - закон зміни температури на поверхні пластини при проведенні відповідного технологічного переходу ("форсажу", "охолодження", "витримки").

Якщо дифузійні процеси при "витримці", "форсажі" та "охолодженні" проходять в окисному середовищі і товщина окислу, при цьому, зростає з часом, то ММ описуються наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_{a1} \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} \right\} + \frac{q}{kT} [D_{a1} N \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial x}] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D_{a1} \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} \right\} + \frac{q}{kT} [D_{a1} N \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial y}], \quad \text{при } (x, y) \in R_{a1}; \quad (25)$$

$$\frac{\partial C(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_{a1 \text{ o}2} \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial x} \right\} + \frac{q}{kT} [D_{a1 \text{ o}2} N \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial x}] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D_{a1 \text{ o}2} \frac{\partial C(x, y, t)}{\partial y} \right\} + \frac{q}{kT} [D_{a1 \text{ o}2} N \frac{\partial \Phi(x, y, t)}{\partial y}], \quad \text{при } (x, y) \in R_{a1 \text{ o}2}; \quad (26)$$

З початковими умовами для розподілу температури та концентрації:

$$C(x, y, 0) = C(x, y), \quad (27)$$

$$T(x, y, 0) = T(x, y). \quad (28)$$

та межовими умовами:

$$\frac{\partial C(0, y, t)}{\partial x} = v(C_1 - C_0), \quad \text{при } 0 \leq y \leq L_y; \quad (29)$$

$$\frac{\partial C(X, 0, t)}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 < x < L_x; \quad (30)$$

$$\frac{\partial C(X, L_y, t)}{\partial y} = 0, \quad \text{при } 0 < x < L_x; \quad (31)$$

$$T(0, y, t) = f(y, t), \quad \text{при } 0 < y < L_y; \quad (32)$$

$$\frac{\partial C(L_x, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \text{при } 0 < y \leq L_y; \quad (33)$$

$$\frac{\partial C(X, y, t)}{\partial x} = h C_{I_{ox}} - C_{I_{si}} / m, \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si; \quad (34)$$

$$\frac{\partial C(X, y, t)}{\partial y} = h C_{J_{ox}} - C_{J_{si}} / m, \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si; \quad (35)$$

$$\frac{\partial C(X, y, t)}{\partial x} = -v_{ox} (C_{I_{si}} - \alpha C_{I_{ox}}), \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si; \quad (36)$$

$$\frac{\partial C(X, y, t)}{\partial y} = -v_{ox} (C_{J_{si}} - \alpha C_{J_{ox}}), \quad \text{при } C(x, y, t) \in SiO_2-Si. \quad (37)$$

У випадку коли дифузійні процеси при "витримці", "форсажі" та "охлажденні" проходять в окисному середовищі і товщина окислу не змінється в процесі перерозподілу домішок, то ММ описується системою диференціальних рівнянь (25 - 26) з початковими умовами (27 - 28) і межовими умовами (29 - 35).

Для розв'язку одновимірних дифузійних задач використовується метод скінченних різниць, а для розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) - метод прогонки. Розв'язок двовимірних дифузійних задач проводиться методом змінних напрямків, який дає можливість: проводити розрахунки з мінімальними витратами оперативної пам'яті ЕОМ; використовувати програмну базу для одновимірного розв'язку.

Розроблені ММ переходів дозволяють сформувати модель повного циклу проведення дифузійних процесів при формуванні напівпровідникових приладів, зв'язати характеристики ІС з температурними процесами в обладнанні, прослідкувати характер впливу технологічних переходів на профілі розподілу легувачих домішок в кристалі та підвищити точність моделювання дифузійних процесів за рахунок визначення більш точного значення коефіцієнта дифузії.

Проведені експериментальні дослідження для визначення залежності поверхневого опору від виграєт газів-носіїв, кисню та газу-носія через джерело. По результатах аналізу експериментальних даних розроблена математична модель розрахунку поверхневої концентрації легувачих домішок бору і фосфору при використанні твердих та рідких дифузентів.

Отримана залежність поверхневої концентрації домішки C_s від параметрів технологічного обладнання має наступний вигляд:

$$C_s = C_{s_{ДЖ}} * A_{C_{Г-Н}} * A_{C_{O_2}} * A_{C_{ДЖ}} \quad (38)$$

де $A_{C_{O_2}}$ - коефіцієнт, який враховує зміну поверхневої концентрації від витрат кисню; $C_{s_{ДЖ}}$ - концентрація домішки, яка випаровується з джерела; $A_{C_{Г-Н}}$ - коефіцієнт впливу витрат газу-носія (азоту чи аргону) на поверхневу концентрацію домішки; $A_{C_{ДЖ}}$ - коефіцієнт впливу витрат газу-носія через рідке джерело на C_s .

Побудовані апроксимаційні залежності зв'язують процеси впровадження домішок з режимами проведення технологічної операції, параметрами обладнання та якістю дифузентів. Це дало можливість пояснити і оцінити зміну властивостей напівпровідникових областей в залежності від процесів газодинаміки в обладнанні і фазових перетворень на поверхні пластин.

В третьому розділі розглянуті математичні моделі технологічних операцій, які тісно пов'язані з дифузійними процесами.

Досліджені та розроблені: математична модель окислення кремнію з врахуванням витрат кисню VO_2 ; модель окислення тонких шарів кремнію; чисельно-аналітична модель нарощення епітаксієвих плівок. Основою для першої ММ окислення є загально відома модель Діла-Гроува. Вплив витрат кисню враховується прискоренням або сповільненням лінійної (В/А) та параболічної (В) констант швидкості окислення:

$$V = \langle V \rangle_i * q, \quad (39)$$

$$V/A = \langle V/A \rangle_i * q, \quad (40)$$

де $\langle V \rangle_i$, $\langle V/A \rangle_i$ - власні значення параболічної та лінійної констант окислення кремнію; q - коефіцієнт, який враховує вплив витрат VO_2 на лінійну та параболічну константи окислення (коефіцієнт q отриманий на основі експериментальних досліджень).

Математична модель окислення тонких шарів кремнію будується аналогічним чином, тобто за основу береться модель Діла-Гроува, а вплив ефекту прискорення лінійної швидкості на початковій стадії окислення враховується виразом:

$$V/A = \langle V/A \rangle_i * \beta, \quad (41)$$

де β - коефіцієнт прискорення лінійної швидкості окислення на початковому етапі процесу.

Чисельно-аналітична модель нарощення епітаксієвих плівок, яка враховує три основні фізичні процеси автолегування, дифузії з епітаксієного шару в підкладку та дифузії з підкладки в епітаксієний шар. В цій моделі профіль автолегування і дифузії з епітаксієного шару в підкладку розраховуються на основі аналітичних виразів, а профіль дифузії з підкладки в епітаксієний шар - чисельним методом (метод скінченних різниць).

Розроблені математичні моделі забезпечують покращення точності вихідних контрольованих параметрів технологічних операцій при значній економії ресурсу ЕОМ.

Адаптовані та досліджені моделі: двовимірною аналізу окислення та ефектів, що проходять під нітридною маскою; нарощення епітаксійних плівок, які дозволяють враховувати процеси в кристалі і на поверхні пластини, конструкцію реактора та взаємодію реагентів в обладнанні; Іонної Імплантації (подвійно-спарена гаусіана та ПРСОН-IV) для аналізу процесів в одно- та двошарових структурах для впровадження легуючих домішок бору, фосфору, сурьми і миш'яку.

Розроблені ефективні алгоритми аналізу процесів окислення, Іонної Імплантації та епітаксійного нарощення, які дозволяють оптимально використовувати машинні ресурси та формувати математичні моделі у вигляді бібліотеки моделей з врахуванням особливостей технології і складності розв'язку.

В четвертому розділі проведено дослідження точності чисельного розв'язку рівняння дифузії в залежності від кроку по координаті, кроку по часу та апроксимації коефіцієнта дифузії в просторовій області. На основі проведених модельних експериментів розроблені вирази для розрахунку кроку по часу та координаті в залежності від необхідної точності чисельного розв'язку та витрат машинного ресурсу.

Розроблена математична модель рельєфу поверхні напівпровідникової структури, яка побудована на основі припущення, що рельєф напівпровідникової структури змінюється лише під час проведення технологічних операцій окислення, травлення, та Іонної Імплантації і в якій загальна товщина зтравленого кремнію n_{Si} для кожної області визначається виразом:

$$H_{Si} = \sum_{i=0}^n d_{Ox_i} + \sum_{j=0}^m d_{Tr_j} + \sum_{l=0}^k d_{Im_l} \quad (42)$$

де n, m, k - кількість технологічних операцій окислення, травлення та Іонної Імплантації в технологічному маршруті виготовлення напівпровідникової структури; d_{Ox_i} - товщина Si , яка витрачається на утворення SiO_2 при i -му окисленні; d_{Tr_j} - товщина кремнію, що зтрапляється при j -му травленні; d_{Im_l} - товщина кремнію, яка розпиляється при проведенні l -ї Імплантації.

Приведена MM дозволяє в процесі проходження технологічного маршруту визначати та аналізувати зміщення поверхні пластини в різних напівпровідникових областях елементів ІС та підвищити точність розрахунку контрольованих параметрів фізичної структури.

Проведено дослідження впливу ефектів прискорення коефіцієнта дифузії в окисному середовищі (домішка бор та фосфор), прискорення коефіцієнта дифузії електричним полем, яке виникає в середині напівпровідникової структури при наявності домішок різного типу провідності, кластеризації домішок та видавлення бази фосфорним емітером на вихідні параметри в реальних напівпровідникових виробках (К1021ХАВ). Оцінена відносна похибка порохованого вихідного контрольованого параметра, що виникає за рахунок не врахування того чи іншого ефекту.

Досліджена і порівняна точність нових дифузійних технологічних операцій з існуючими. Отримані результати показують, що розроблені математичні моделі дифузії дозволяють підвищити точність вихідних контрольованих параметрів технологічних операцій та в більшій мірі вивчити фізичні процеси, які проходять при цих технологічних операціях.

П'ятий розділ присвячений розробці програмно-методичного комплексу (ПМК) "ПроМІС-Т" його архітектури та підсистем, визначено особливості побудови і функціонування комплексу та його складових частин. Запропонована структура дозволила ефективно реалізувати розроблену методіку, алгоритми та моделі аналізу дифузійних процесів при наскрізному проектуванні ІС.

Визначені функції базового, загальносистемного та спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) ПМК. Розроблений спеціалізований монітор, який регламентує послідовність функціонування комплексу, формує схему рішення задач, визначає дерево використання бібліотеки математичних моделей технологічних переходів, забезпечує ефективну діалогову взаємодію з користувачем і коректне редагування та збереження інформації. Спеціалізоване ПЗ дозволяє використовувати різні математичні методи, поєднувати моделі різної математичної складності, ефективно використовувати ресурс ЕОМ, поповнювати БММТП новими евристичними правилами і математичними моделями.

Сформовано основні задачі інформаційного забезпечення ПМК. Спроектовано і програмно реалізовано оперативну базу даних, що забезпечує ефективне використання оперативної пам'яті обчислювальної техніки, швидку взаємодію пакету прикладних програм (ППП) з базою даних (БД) на зовнішніх носіях, усунення недоліків обмеженості ресурсу обчислювальної техніки. Система управління БД дозволила структурувати окремі програмні модулі, дисциплінувати процеси програмування на різних мовах високого рівня, забезпечити однотипність різних ППП по входу і виходу, визначити однотипну ідеологію роботи

рівних програмістів при розробці однієї системи.

Розроблена проблемно-орієнтована мова ПМК, яка за допомогою запропонованих сценаріїв забезпечує швидку взаємодію з користувачем, підказку та навчання в процесі рішення задачі, побудову оптимальних маршрутів аналізу дифузійних процесів при проектуванні ІС. Структура сценаріїв вхідної мови дозволяє навчати студентів і молодих спеціалістів, провести класифікацію типових і базових ТП, формувати необхідну топологію і фізичну структуру кристалу, визначати критичні області аналізу напівпровідникового кристалу, аналізувати результати моделювання і ефективність використання математичного апарату.

В додатках приведені виведення: основних співвідношень для розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь методом прогонки при межових умовах першого роду; виразу для електростатичного потенціалу, виходячи з умов квазінейтральності та квазірівноваги; основних співвідношень для двовимірного чисельного моделювання дифузійних процесів та вирази для врахування впливу зовнішнього середовища на швидкість окислення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблений алгоритм моделювання технологічних операцій формування напівпровідникової структури, який дозволив функціонально зв'язати характеристики інтегральних схем з режимами технологічного процесу, параметрами обладнання та матеріалів.
2. Запропонована і реалізована бібліотека математичних моделей технологічних переходів на основі розроблених методів, математичних моделей та алгоритмів аналізу формулних операцій, яка дозволяє ефективно генерувати та проектувати технологічні маршрути, якісно та кількісно оцінювати основні характеристики технологічності конструкції, адаптуватись до існуючих промислових САПР ТП.
3. Розроблені та досліджені математичні моделі дифузійних процесів, окислення кремнію, іонної імплантації та епітаксійного нарощення в одно- і двовимірному наближенні. Запропоновані моделі дозволяють враховувати процеси в кристалі і на поверхні пластини; ефекти піднітридною маскою та прискорення процесів для окислення тонких окислів; конструкцію реактора та взаємодію реагентів в обладнанні; враховувати фазові переходи на поверхні і в тілі напівпровідника; перерозподіл легуючих домішок в напівпровідникових структурах.
4. Проведені експериментальні дослідження технологічних операцій та

переходів «завантаження», «форсажу», «охолодження» і «витримки», що дозволило зв'язати характеристики ІС з температурними процесами в обладнанні; оцінити характер впливу технологічних переходів на профілі розподілу легучих домішок в кристалі; побудувати залежності поверхневого опору від витрат газів-носіїв, кисню та газу-носія.

5. Розроблена математична модель рельєфу поверхні напівпровідникової структури, яка дозволяє в процесі проходження технологічного маршруту визначати та аналізувати зміщення поверхні пластини в різних напівпровідникових областях елементів ІС та підвищити точність розрахунку контрольованих параметрів фізичної структури.

6. Розроблені ефективні алгоритми моделювання дифузійних процесів, окислення, іонної імплантації, епітаксіального нарощення в одно- і двовимірному наближенні.

7. Проведено дослідження точності чисельного розв'язку рівняння дифузії. На основі отриманих результатів розроблені математичні вирази для розрахунку кроку по часу та координаті в залежності від необхідної точності чисельного розв'язку та ресурсів ЕОМ.

ПУБЛІКАЦІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Гранат П.П., Теслиж В.М. Моделювання технологічних процесів напівпровідникових інтегральних схем на базі ПЕОМ. // Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. Вісник ЛП №272.-Львів: "Вища школа", 1993 р. - с.19-21.

В даній публікації Теслижу В.М. належить теоретична та практична розробка алгоритму моделювання технологічних процесів виробництва ІС, який враховує фізичні процеси в напівпровідниковому кристалі, на його поверхні та в обладнанні.

2. Гранат П.П., Кіселичник М.Д., Теслиж В.М. Моделі дифузійних процесів в напівпровідникових структурах. // Радіотехнічний - вчора, сьогодні, завтра... Збірник праць співробітників та випускників РТФ, ЛП.-Львів: "Вища школа", 1992 р. - с.81-86.

У вказаній роботі Теслижу В.М. належить формалізація та практична реалізація одновимірних математичних моделей дифузійних технологічних переходів ("згонка", "розгонка", "розгонка" з окисленням та "розгонка" під окислом постійної товщини)

3. Коваль В.О., Гранат П.П., Теслиж В.Н. Автоматизированная система технологического проектирования полупроводниковых ИС. // В сб. Техника, экономика. Сер. Автоматизация проектирования, вып. 2-3. -М.: Изд-во ВИМИ, 1994 г.-ст.98-105.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

В приведеній роботі Тесляк В.М. розробив структуру бібліотеки математичних моделей технологічних переходів і системи керування БММТП та реалізував алгоритм й методику технологічного моделювання ІС.

4. Гранат П.П., Тесляк В.М., Романко В.О. Розробка математичних моделей аналізу дифузійних процесів в напівпровідникових структурах. // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів: Матеріали Міжнародної НТК (лигій 1994 р. с.Славсьько), Львів: ДУ "ЛП", 1994 р.-с.56-59.

В статті Тесляку В.М. належить формалізація та реалізація на ЕОМ математичних моделей дифузійних процесів, які використовуються у виробництві ІС.

5. Тесляк В.М. Задачі технологічного аналізу в циклі наскрізьних САПР ВІС. // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів: Матеріали Міжнародної НТК (лигій 1994 р. с.Славсьько), Львів: ДУ "ЛП", 1994 р.-с.87-89.

Тесляком В.М. визначені основні задачі, які виникають при аналізі технологічного процесу виготовлення ІС в циклі наскрізьних САПР

6. Гранат П.П., Тесляк В.М., Назар А.В. Математична модель формування епітаксіальних шарів. // Сучасні проблеми автоматизованої розробки і виробництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів: Матеріали Міжнародної НТК (лигій 1994 р. с.Славсьько), Львів: ДУ "ЛП", 1994 р.-с.90-92.

В даній статті Тесляк В.М. провів математичну формалізацію задачі формування епітаксіальних шарів і реалізував на ЕОМ.

7. Коваль В.О., Гранат П.П., Тесляк В.М. Методика моделювання технологічних процесів виробництва ІС. // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Тези доповідей НТК (лигій 1993 р.), Львів: ВО "Полярон", 1993 р.-с.20.

В цій роботі Тесляком В.М. теоретично розроблена методика моделювання технологічних процесів виробництва ІС та бібліотека математичних моделей ехнологічних переходів.

8. Гранат П.П., Процик А.С., Тесляк В.Н. Программно-методический комплекс моделирования технологических процессов производства ИС. // Высокие технологии в проектировании технических устройств и автоматизированных систем: Тез. докл. Всероссийское совещание-семинар (сентябрь 1993 г.), Воронеж: ВПИ, 1993 г.-с.92.

В даних тезах Тесликом В.М. розроблена структура ПМК "ПроМІС-Т" та розроблені і реалізовані на електронно-обчислювальній машині математичні моделі термічного окислення, дифузії, епітаксії. 9. Монастырский Л.С., Кокодыня А.С., Теслик В.Н. Двухмерное моделирование разгонки ионно-имплантированной примеси в кремниевых ИМС. // Высокие технологии в проектировании технических устройств и автоматизированных систем: Тез. докл. Всероссийское совещание-семинар (сентябрь 1993 г.), Воронеж: ВПИ, 1993 г.-с.65.

В цих тезах Теслику В.М. належить розробка двовимірної математичної моделі "розгонки" та алгоритму розрахунку на ЕОМ.

10. Гранат П.П., Теслик В.Н., Процик А.С. Система технологического моделирования полупроводниковых ИС. // Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств: Тез. докл. НГК (сентябрь 1993 г.), Бердянск: ЗМИ, 1993 г.-с.140.

У вказаній роботі Теслику В.М. належить розробка та практична реалізація вхідної мови для ПМК "ПроМІС-Т".

11. Теслик В.М. Дифузійна математична модель впровадження домішок. // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. НГК (лютий 1995р. с.Славсько), Львів: ВО "Полярон", 1995р.-с.49

У цих тезах Теслик В.М. розробив та реалізував на ЕОМ математичну модель "загонки" з окисленням з врахуванням фізичних процесів в кристалі та на його поверхні.

12. Теслик В.М., Пастернак В.В., Насипайко О.М. Математична модель окислення кремнію з врахуванням витрат кисню. // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. НГК (лютий 1995р. с.Славсько), Львів: ВО "Полярон", 1995р.-с.41

В даних тезах Теслику В.М. належить проведення експериментальних досліджень пов'язаних з залежністю товщини окислу від витрат кисню і розробка математичної моделі окислення кремнію, яка враховує витрати кисню.

13. Теслик В.М., Пастернак В.В., Романко В.О. Двовимірне моделювання дифузійних процесів. // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. НГК (лютий 1995р. с.Славсько), Львів: ВО "Полярон", 1995р.-с.67.

В цих тезах Теслику В.М. належить побудова двовимірних математичних моделей дифузії та реалізація на ЕОМ, базуючись на методі змінних напрямків.

14. Коваль В.О., Гранат П.П., Теслик В.М. Математичні моделі техно

логічних переходів "охладження" та "форсажу". // Досвід розробки і застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Тез. доп. НТК (лютий 1995р. с.Славсьько), Львів: ВО "Поларон", 1995р.-с.72.

В даних тезах Теслику В.М. належить проведення експериментальних досліджень пов'язаних з визначенням характеру зміни температури в дифузійній трубці під час проведення дифузійних технологічних операцій, побудова математичної моделі зміни температури в дифузійній печі та розробка і реалізація на ЕОМ математичних моделей "охладження" й "форсажу".

Особистий внесок автора в отриманні наукових результатів полягає в тому, що положення, які складають суть дисертації були сформульовані і вирішені ним самостійно:

- 1) Аналіз технологічних задач в процесі проектування напівпровідникових ІС (9);
- 2) Розроблений алгоритм моделювання технологічних процесів і проведена структуризація математичних моделей (3,7);
- 3) Розроблені математичні моделі технологічних переходів в процесі дифузії домішок (2,8,11,13,14);
- 4) Розроблені моделі термічного окислення, росту епітаксійних шарів, іонного легування та рельєфу напівпровідникової структури (5,10,12);
- 5) Розроблена архітектура і основні принципи та етапи програмної реалізації ПМК "ПромІС-Т" (1,3,4,6).

Abstract.

Teslyuk V.M. Simulation and analysis of formation processes of IC technological layers in device-technological CAD systems. Dissertation paper for fulfillment of the scientific degree of technical science candidate according to speciality 05.13.05 - Design Automation Systems. State University "Lvivska Politechnika", Lviv, 1995.

In this dissertation paper the following things are defended: the methodics and algorithm of simulation of the IC production technological routes; the mathematical models of diffusion and oxidation technological operations; the mathematical model of semiconductor structure relief and the models of the processes in equipment.

It was established that: 1) developed mathematical models of technological operations allow to improve the calculation accuracy of the output controlled parameters; 2) offered and performed methodics, algorithm of simulation of the IC production technological routes and algorithms of technological operations simulation allow to organize the calculation process more efficiently; 3) program - methodical complex ProMIC-T is developed and performed.

Анотація.

Тесляк В.Н. Моделирование и анализ процессов формирования технологических слоев ИС в приборно-технологических САПР. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - Системы автоматизации проектирования. Госуниверситет "Львівська політехніка", г. Львів, 1995 г.

В диссертационній роботі захищається: методика і алгоритм моделювання технологічних маршрутів виготовлення ІС; математичні моделі технологічних операцій дифузії і окислення; математична модель рельєфу напівпровідникової структури і моделі процесів в обладнанні.

Установлено, що 1) розроблені математичні моделі технологічних операцій дозволяють підвищити точність розрахунку вихідних контролюваних параметрів; 2) запропоновані і реалізовані методика, алгоритм моделювання технологічних маршрутів виготовлення ІС і алгоритми моделювання технологічних операцій дають можливість ефективно організувати процес вичислень; 3) розроблені і реалізовані ПМК "ПроМІС-Т".

Ключові слова: САПР, ПМК, алгоритм, точність, модель, дифузія.

Підписано до друку /7, 05.95. Формат паперу 60x84 1/16
Папір газетний. Друк офсетний. Безкоштовно.
Друкарських листів 1, Зам. 172. Тираж 100.

4168862

AB 32.406

AB 32.406