

Національний університет “Львівська політехніка”

ЛЕВУС ЄВГЕНІЯ ВАСИЛІВНА

004.3'124:621.3.049.77

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ТЕПЛОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ
МЕП З КРИСТАЛАМИ НА ЖОРСТКИХ ВИВОДАХ**

Спеціальність 05.13.12 - Системи автоматизації проектувальних робіт

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Львів – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Федасюк Дмитро Васильович,

професор кафедри “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Недоступ Леонід Аврамович,

професор кафедри “Теоретична радіотехніка та радіовимірювання” Національного університету “Львівська політехніка”, м. Львів

кандидат технічних наук, доцент

Крищук Володимир Миколайович,

завідувач кафедри “Конструювання та виробництво радіоапаратури” Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя

Провідна установа: Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

Захист відбудеться “24” січня 2003 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 при Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою 79646, м. Львів, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79646, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “23” грудня 2002 р.

В.о. вченого секретаря

спеціалізованої вченої ради,

д.т.н, доцент

Матвійчук Я.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність наукової проблеми. Характерні тенденції розвитку мікроелектронних систем – мікромініатюризація, підвищення рівня інтеграції компонентів, застосування потужних елементів та нових матеріалів при складному функціональному призначенні – приводять до концентрації великих потужностей тепловиділення в малих об'ємах. Така ситуація спричиняє потребу в організації додаткових засобів для відведення надлишкової теплоти, оскільки неврахування впливу температури на функціонування мікроелектронних пристроїв (МЕП) викликає збільшення кількості відмов функціонування, а отже, погіршення надійнісних характеристик мікроелектронних виробів. Високі технології в сфері виробництва МЕП потребують проведення етапу проектування виробу. Для врахування теплових факторів у процесі проектування МЕП насамперед необхідно аналізувати температурні поля, які формуються при функціонуванні пристрою. Саме від результатів аналізу температурних полів залежать подальші етапи теплового проектування, кінцевим завданням якого є забезпечення необхідного температурного режиму пристрою.

Історія розвитку методів та засобів теплового проектування МЕП починається з 60-х років минулого століття. Саме з того часу ряд вітчизняних та закордонних вчених присвячують свої роботи питанням розроблення, дослідження та алгоритмізації моделей та методів аналізу температурних полів МЕП, які мали за мету замінити в загальному процесі проектування МЕП інтуїтивні методи реалізації необхідного теплового режиму. Серед вітчизняних наукових шкіл можна відзначити школи Л.А. Коздоби, Ю.Е. Спокойного, Ю.М. Мацевитого та інші. Пошуку ефективних шляхів розв'язування задач теплового проектування МЕП присвячені також наукові роботи відомих закордонних вчених: Г. Н. Дульнева, К.О. Петросянца (Росія), А. Наперальсь-кого (Польща), Ж. Де Мейя (Бельгія), В. Секела (Угорщина). Проте відомі сьогодні методи та засоби теплового проектування МЕП не можуть відповісти на всі питання, які виникають в практичній діяльності. Насамперед це пояснюється інтенсивним розвитком технологій виробництва МЕП, що пов'язано із збільшенням інтеграції компонент в мікроелектронних системах. Внаслідок цього виникли задачі теплового проектування, які потребують розроблення нових математичних моделей та методів аналізу температурних полів з можливістю врахування розвитку різних способів тепловідведення у конструкціях МЕП, для яких застосування універсальних методів температурного аналізу, як показує досвід проектувальників МЕП, є дуже складним, оскільки вимагає додаткових досліджень та розроблень спеціальних алгоритмів для забезпечення відповідної точності результатів при обмежених обчислювальних ресурсах. До таких задач належить аналіз температурних полів МЕП з кристалами на жорстких виводах (*flip chip devices*).

Серед сучасних технологій вироблення МЕР способ встановлення кристала активною стороною вниз забезпечує одну з найбільших густин збирання МЕР. До найістотніших переваг цієї технології МЕР належать: висока надійність та технологічність з'єднань, високий ступінь інтеграції з максимально можливою економією площі та ваги, гнучкість структури, сумісність з іншими технологіями виробництва МЕР.

Отже, у зв'язку з підвищенням вимог щодо функціональних, експлуатаційних та економічних показників сучасних МЕР актуальним стає завдання підвищення ефективності теплового проектування широко поширених МЕР, виконаних за перспективною технологією – встановленням кристала на жорсткі виводи, яка може бути вирішена шляхом створення нових і розвитку відомих математичних моделей та методів температурного аналізу та реалізації їх у вигляді програмних засобів автоматизації теплового проектування.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з напрямами наукової роботи кафедри “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка”, а саме:

1. З планом робіт по темі “ДБ/80 РТ” – “Моделювання температурних полів в конструкціях мікроелектронних пристроїв та технологічному обладнанні при їх виготовленні”, яка виконувалася в межах пріоритетного напрямку Міністерства освіти України і входила до координаційного плану “Інформатика і нові інформаційні технології” за програмою №71 “Методи проектування і створення комп'ютеризованих систем і технологій” на 1998-1999 рр. (номер державної реєстрації 0198U002386). Участь автора полягала в розробленні моделей нестационарних температурних полів в МЕР з кристалами на жорстких виводах та методів їх аналізу, алгоритмізації цих методів та їх програмній реалізації.

2. З програмою Міжнародного наукового проекту ЕС COPERNICUS – THERMINIC C3940922 (New methods for THERMal Investigation of Integrated Circuits), термін виконання 1995-1998 рр. Участь автора полягала в розробленні та дослідженні моделей стаціонарних температурних полів в МЕР з кристалами на жорстких виводах, алгоритмізації та програмній реалізації методів їх аналізу.

Мета і задачі дисертаційної роботи. Метою даної роботи є розроблення моделей та методів аналізу тривимірних стаціонарних та нестационарних температурних полів МЕР з кристалами на жорстких виводах. Запропоновані моделі та методи повинні бути високоточними, алгоритмізованими та програмно реалізованими у системі температурного аналізу, не потребувати при цьому великих обчислювальних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- проаналізувати конструкції МЕП з кристалами на жорстких выводах та охарактеризувати особливості процесів теплообміну, що проходять у них в режимі функціонування пристрою;
- побудувати математичну модель теплообміну для МЕП з кристалами на жорстких выводах;
- розробити відповідні методи аналізу температурних полів МЕП цього типу;
- розробити склад і функціональну організацію системи аналізу температурних полів МЕП з кристалами на жорстких выводах та програмно її реалізувати;
- дослідити запропоновані теплові моделі на точність результатів моделювання, порівняти отримані результати теплового моделювання з вже відомими даними моделювання температурних полів;
- оцінити вплив різних параметрів конструкції на формування температурних полів та опрацювати отримані результати.

Об'єкт досліджень – теплове проектування МЕП з кристалами, встановленими на жорсткі виводи.

Предмет досліджень – стаціонарні та нестаціонарні температурні поля МЕП з кристалами, встановленими на жорсткі виводи.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач використовувались теорія теплообміну для побудови теплової моделі та її математичної формалізації, методи математичної фізики та апарат обчислювальної математики для розв'язування крайових задач теплопровідності, методи прикладного і системного програмування для розробки системи температурного аналізу. Достовірність результатів тестових теплових досліджень із використанням розробленої системи температурного аналізу підтверджена шляхом порівняння отриманих результатів з експериментальними даними, відомими з літератури та результатами математичного моделювання іншими програмними засобами теплового проектування.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи формулюється у вигляді таких положень:

1. Розвинуто відому аналітичну модель стаціонарних тривимірних температурних полів МЕП з кристалами на жорстких выводах за рахунок врахування теплофізичних та конструктивних характеристик тепловідвідних елементів.
2. Побудовано нову фізико-математичну тривимірну модель нестаціонарних температурних полів МЕП з кристалами на жорстких выводах, яка дозволяє застосувати новий аналітико-числовий метод теплового аналізу для отримання теплових потоків через виводи та температурних полів в структурі з достатньою точністю та адекватністю результатів.
3. Розроблено новий аналітико-числовий метод температурного аналізу МЕП з кристалами на

жорстких виводах, що апроксимує шукану функцію за однією з координат лінійною комбінацією і порівняно з відомими числовими методами не потребує розроблення допоміжних процедур забезпечення заданої точності обчислень при обмежених обчислювальних ресурсах.

4. Запропоновано вирішення задачі вибору типового варіанта тепловідведення на основі аналізу автоматично створеної області пошуку конструктивних та теплофізичних параметрів конструкції МЕР з кристалами на жорстких виводах, що дозволяє отримати початкове проектне рішення як рекомендацію забезпечення необхідного температурного режиму.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати аналізу температурних полів мають практичну цінність, оскільки можуть враховуватися при проектуванні МЕР. Розроблена система теплового аналізу ТАFC (*Thermal Analysis of Flip Chip*) дозволяє істотно скоротити витрати на дослідження теплових процесів в МЕР з кристалами на жорстких виводах та зменшити термін їх проектування, оскільки дозволяє уникнути проведення довготривалих та дорогих експериментів з дослідження теплових режимів. Сформована система типових рішень для пониження теплового опору конструкції та побудований алгоритм вибору дозволяють визначати необхідні параметри конструкції, при яких температура не буде перевищувати допустимі значення. Розроблене математичне забезпечення покладено в основу мережевої системи аналізу температурного поля WebТАFC, за допомогою якої через Internet чи локальну комп'ютерну мережу можна здійснювати теплове моделювання МЕР з кристалами, встановленими на жорсткі виводи.

Реалізація результатів роботи. Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи використовувались на Львівському державному заводі “ЛОРТА”, що підтверджується відповідним актом впровадження результатів дисертаційної роботи, а також – в навчальному процесі кафедри “Системи автоматизованого проектування” з курсу “Автоматизовані системи теплового проектування”.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, викладені в дисертації, отримані автором самостійно. У публікаціях, що написані в співавторстві, розглянуті ширші аспекти теплового проектування, ніж ті, що висвітлені в роботі. Автору дисертації належить такі результати: [1] – дослідження результатів моделювання стаціонарних температурних полів МЕР з кристалами на жорстких виводах; [2] – виконання тестових модельних експериментів температурних полів МЕР з кристалами на жорстких виводах та аналіз і опрацювання отриманих результатів; [3,10,11] – розроблення процедури формування рекомендації для забезпечення необхідного теплового режиму МЕР з кристалами на жорстких виводах на основі дослідження впливу теплофізичних та конструктивних параметрів конструкції на температурні поля;

- [4] – формування основних вимог щодо системи теплового аналізу;
- [5,8,13] – побудова математичної моделі нестационарного теплообміну в конструкціях МЕР з кристалами на жорстких виводах, розроблення методу аналізу температурних полів та дослідження результатів.
- [6,12,14] – розвиток аналітичної стаціонарної тривимірної моделі температурних полів МЕР з кристалами на жорстких виводах та розроблення методу температурного аналізу, алгоритмізація та програмна реалізація методів температурного аналізу;
- [7] – побудова обчислювального алгоритму, розроблення архітектури та функціональної організації системи температурного аналізу МЕР з кристалами на жорстких виводах.

Крім цього, результати дисертаційної роботи висвітлені ще в інших публікаціях, посилання на які наведено в дисертації.

Апробація роботи. Основні теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-методичній конференції “Комп’ютерне проектування в навчальному процесі” (м. Львів, 1998), міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці”(м. Львів, 1999), міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці” (м. Львів, 1999), міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми телекомунікації, комп’ютерних наук та підготовки інженерних кадрів” (м. Львів, 2000), міжнародній конференції Workshop THERMINIC’99, (м. Рим, 1999), міжнародній конференції “Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems” – DDECS’2000 Workshop (м.Смоленце, Словачія), міжнародних конференціях “Mixed Design of Integrated Circuits and System” – MIXDES’2000 (м.Гдиня, Польща), 2001 (м.Закопане, Польща), міжнародній конференції з індуктивного моделювання – МКІМ2002 (м. Львів, 2002).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на науковому семінарі кафедри “Системи автоматизованого проектування” Національного університету “Львівська політехніка”.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 15 праць, з них 7 – у фахових наукових виданнях, тези доповіді на конференції, 2 публікації в міжнародних наукових журналах, 5 публікацій у збірниках праць міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків (128 сторінок друкованого тексту), 6 додатків, списку літератури (119 назв), 33 рисунків та 15 таблиць. Загальний обсяг дисертації 150 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладається загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтовується актуальність наукової проблеми і теми роботи, сформульовані мета і задачі роботи, методи досліджень, наукова новизна, висвітлюється практична цінність проведених науково-технічних досліджень та отриманих результатів. Наведено зміст і структуру роботи, дані про публікації, апробацію роботи і впровадження результатів роботи.

У **першому розділі** дисертації розглянуто роль та місце теплового проектування в загальній схемі проектування МЕР. Проведений огляд літератури з тематики теплового моделювання та аналіз найвідоміших сучасних систем теплового проектування дали змогу сформулювати характерні аспекти проблеми теплового проектування МЕР з кристалами на жорстких виводах. Ряд спрощень щодо одно- та двовимірності теплових потоків та самої структури кристала не можуть у повному обсязі бути застосованими до переважної більшості існуючих сьогодні типових конструкцій МЕР з кристалами на жорстких виводах. У випадках, коли моделююча частина ґрунтується на одному з потужних числових методів, програмна реалізація системи аналізу орієнтована на потужну обчислювальну техніку, вимагає складного алгоритму генерації сітки розбиття, додаткових досліджень та розроблення спеціальних алгоритмів для забезпечення відповідної точності результатів. Тому необхідним є розроблення моделей, методів, алгоритмів температурного аналізу МЕР з кристалами на жорстких виводах, для яких характерними є :

- висока точність отриманих результатів;
- достатня швидкодія процесу обчислення;
- незалежність обчислення температури в окремій точці від значень в інших точках, як це буває у сіткових схемах;
- проста алгоритмічна та програмна реалізація розроблених математичних моделей та методів, яка на відміну від сіткових методів не вимагає розроблення спеціальних алгоритмів для генерації сітки.

Для побудови теплової моделі конструкції МЕР з кристалами на жорстких виводах дано загальну характеристику структури цієї конструкції та її параметрів, які визначають характер процесів теплообміну в ній. Основними елементами такої конструкції є кристал з джерелами тепла, підшарок і жорсткі виводи. Кристал і підшарок у загальному випадку є багатошаровими структурами, в яких може використовуватися довільне поєднання шарів різної товщини, виготовлених з різних матеріалів. Виводи розрізняють за геометричною формою, матеріалом виготовлення, а в разі багатошарового підшарку – за контактом з шарами підшарку і роллю в процесі відведення тепла. Тип виводів визначається залежно від глибини контакту з підшарком. У

разі контакту виводу з поверхнею підшарку говорять про сигнальні виводи (виводи першого типу), у випадку проникнення стовпчика виводу у шари підшарку – про конструктивні виводи (другого типу).

Другий розділ присвячений дослідженню і розвитку моделі тривимірних стаціонарних температурних полів конструкцій МЕР з кристалами, встановленими на жорсткі виводи двох типів. Кожен з виводів першого типу (загальна кількість kr_1) характеризується площею поперечного перерізу $S_{\text{вив}1k}$ та потужністю тепловиділення $P_{\text{вив}1k}$, а координати його центра $(X_{\text{вив}1k}, Y_{\text{вив}1k})$ визначають розміщення на нижній грані кристала, $k = \overline{1, kr_1}$. Для виводів другого типу (загальна кількість kr_2) аналогічно маємо значення $S_{\text{вив}2l}$, $P_{\text{вив}2l}$ та $(X_{\text{вив}2l}, Y_{\text{вив}2l})$, де $l = \overline{1, kr_2}$. Математична модель стаціонарних температурних полів багат шарових кристала (N шарів) та підшарку (M шарів) задається у вигляді двох крайових задач теплопровідності у формі систем диференціальних рівнянь в часткових похідних другого порядку з граничними умовами, які моделюють тепловідведення з поверхонь структури конструкції. Між шарами кристала (підшарку) задаються умови ідеального теплового контакту. Кожне рівняння описує процес теплопровідності для окремого шару кристала в системі координат $(x_1, y_1, z_1^{(i)})$ чи підшарку в системі координат $(x_2, y_2, z_2^{(j)})$. Розв'язки шукаються як $T_1^{(i)}(x_1, y_1, z_1)$ – значення температури в i -му шарі кристалу, $T_2^{(j)}(x_2, y_2, z_2)$ – значення температури в j -му шарі підшарку. Запропоновані інтегральні умови неперервності теплових потоків через виводи, які зв'язують області кристала та підшарку, враховують, на відміну від відомої моделі, теплопровідність матеріалу виводів ($\lambda_{\text{вив}k}$) та їх висоту ($h_{\text{вив}k}$):

$$\iint_{S_{\text{вив}1k}^1} T_1^{(N)}(x_1, y_1, z_1^{(N)}) dx_1 dy_1 = \iint_{S_{\text{вив}1k}^2} T_2^{(1)}(x_2, y_2, 0) dx_2 dy_2 + \frac{h_{\text{вив}1}}{\lambda_{\text{вив}1k}} P_{\text{вив}1k}, \quad (1)$$

$$\iint_{S_{\text{вив}2l}^1} T_1^{(N)}(x_1, y_1, z_1^{(N)}) dx_1 dy_1 = \iint_{S_{\text{вив}2l}^2} T_2^{(1)}(x_2, y_2, z_2^{(1)}) dx_2 dy_2 + \frac{h_{\text{вив}2}}{\lambda_{\text{вив}2l}} P_{\text{вив}2l}. \quad (2)$$

Рівняння (1) задається для виводів першого типу, (2) – виводів другого типу. У відомій аналітичній моделі стаціонарних температурних полів МЕР з кристалами на жорстких виводах вихідними припущеннями були висока теплопровідність матеріалів, з яких виготовлені виводи двох типів, та достатньо невелика їх висота. Використання умов (1) та (2) дозволило зняти обмеження на матеріал виводів та їх висоту, чим досягнуто значне розширення класу досліджуваних МЕР з кристалами на жорстких виводах. Зокрема, на основі розвинутої математичної моделі можна

проводити теплові дослідження поширених конструкцій, в яких використовується заповнення епоксидним матеріалом області виводів.

Шукані функції температури кристала та підшарку знаходяться у вигляді двократних тригонометричних рядів Фур'є, коефіцієнти яких є розв'язками системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), сформованих на основі граничних умов задачі теплообміну.

Застосування умов (1), (2) зводиться до розв'язування СЛАР, розв'язком якої є потужності виводів. Матричний вигляд СЛАР поданий нижче:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\ k_{p1}} & a_{1\ k_{p1}+1} & \dots & a_{1\ k_{p1}+k_{p2}} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2\ k_{p1}} & a_{2\ k_{p1}+1} & \dots & a_{2\ k_{p1}+k_{p2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_{p1}\ 1} & a_{k_{p1}\ 2} & \dots & a_{k_{p1}\ k_{p1}} & a_{k_{p1}\ k_{p1}+1} & \dots & a_{k_{p1}\ k_{p1}+k_{p2}} \\ a_{k_{p1}+1\ 1} & a_{k_{p1}+1\ 2} & \dots & a_{k_{p1}+1\ k_{p1}} & a_{k_{p1}+1\ k_{p1}+1} & \dots & a_{k_{p1}+1\ k_{p1}+k_{p2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_{p1}+k_{p2}\ 1} & a_{k_{p1}+k_{p2}\ 2} & \dots & a_{k_{p1}+k_{p2}\ k_{p1}} & a_{k_{p1}+k_{p2}\ k_{p1}+1} & \dots & a_{k_{p1}+k_{p2}\ k_{p1}+k_{p2}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{\text{вив1}\ 1} \\ P_{\text{вив1}\ 2} \\ \dots \\ P_{\text{вив1}\ k_{p1}} \\ P_{\text{вив2}\ 1} \\ \dots \\ P_{\text{вив2}\ k_{p2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_{k_{p1}} \\ \sigma_{k_{p1}+1} \\ \dots \\ \sigma_{k_{p1}+k_{p2}} \end{pmatrix}$$

Подана схема обчислювального процесу потужностей тепловиділення жорстких виводів і температури в кристалі та підшарку (рис.1).

Рис.1. Схема обчислювального процесу

Обчислювальні процедури блоків 1.1, 2 є знаходженням сум двократних рядів, загальний член яких є добуток тригонометричних та експоненціальної функцій. Процедура наведена блоком 3, є обчисленням арифметичних виразів, що містять експоненціальні функції. Після цього може бути обчислена температура в довільній точці незалежно від обчислень в інших точках.

Найбільшу обчислювальну (програмну, часову та місткісну) складність має перша частина алгоритму обчислювального процесу, яка стосується ініціалізації матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь, і з ростом кількості жорстких виводів, незалежно від їх теплофізичних та конструктивно-топологічних параметрів, має квадратичний характер.

Третій розділ присвячений розробленню і дослідженню моделі нестационарних процесів теплопровідності та методу аналізу температурних полів конструкцій МЕР з кристалами, встановленими на жорсткі виводи. Модель стаціонарних температурних полів не може охопити всі режими функціонування пристрою, зокрема інший характер мають режими увімкнення та вимкнення.

Аналіз конструкцій показав, що для всіх конструкцій МЕР з кристалами на жорстких виводах

характерна спільність конструктивного рішення. Це дозволяє побудувати геометрично базову теплову модель для кристала та підшарка у вигляді системи двох паралелепіпедів, об'єднаних за допомогою виводів (рис.2), які незалежно від їх форми геометрично апроксимуємо також у вигляді паралелепіпедів.

Рис.2.Схематичне зображення кристала на жорстких виводах

Нестационарний процес теплообміну для кристала з плоскими джерелами тепла описується рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z_1^2} - \frac{c_1 \rho_1}{\lambda_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де λ_1 – коефіцієнт внутрішньої теплопровідності, c_1 – питома теплоємність, ρ_1 – питома густина кристала.

Запишемо граничну умову для нижньої грані кристала, враховуючи розміщення там джерел тепла ($P_{дж\ i}(t)$, $S_{дж\ i}(t)$ - потужність тепловиділення та площа і-го джерела) та жорстких виводів ($P_{вив\ j}(t)$, $S_{вив\ j}(t)$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial z_1} \Big|_{z_1=-h} = Q^- = \begin{cases} \frac{P_{вив\ j}(t)}{\lambda_1 S_{вив\ j}}, \text{ якщо } (x_1, y_1) \in S_{вив\ j}, \\ -\frac{P_{дж\ i}(t)}{\lambda_1 S_{дж\ i}}, \text{ якщо } (x_1, y_1) \in S_{дж\ i}, \\ 0, \text{ інакше} \end{cases} \quad (4)$$

Припущення про пасивність у процесах тепловідведення вільних площадок на активній ділянці кристала приймаємо внаслідок незначної їх участі в загальному процесі тепловідведення, оскільки їх площа здебільшого становить 5 відсотків від площі активної ділянки.

Зокрема, при моделюванні режиму увімкнення пристрою задається $P_{дж\ i}(t) = \begin{cases} 0, t = 0 \\ P_{дж}, t > 0 \end{cases}$, а

$P_{вив\ j}(t)$ – невідомі величини, які визначаються з умови спряження областей кристала та підшарку.

Для верхньої грані кристала вільний теплообмін зі середовищем температури $T_{сер1}$ задається умовою:

$$\frac{\partial T_1}{\partial z_2} \Big|_{z_1=h} = Q^+ = -\frac{\alpha_{T1}}{\lambda_k} (T_{|z_1=h} - T_{сер1}). \quad (5)$$

Бічні грані кристала та підшарку вважаються теплоізолюваними за рахунок незначної їх площі та малої ролі конвективного теплообміну в тепловідведенні:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=0}^{x_1=K_1} = \frac{\partial T_1}{\partial y_1} \Big|_{y_1=0}^{y_1=K_2} = 0. \quad (6)$$

У початковий момент часу вважається, що температура конструкції стала для всіх точок – як правило, вона дорівнює температурі навколишнього середовища:

$$T_1(x_1, y_1, z_1, 0) = T_1^0. \quad (7)$$

Аналогічно задача теплообміну записується для підшарку розмірами $P_1 \times P_2$ завтовшки $2r$:

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z_2^2} - \frac{c_2 \rho_2}{\lambda_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0}^{x_2=P_1} = \frac{\partial T_2}{\partial y_2} \Big|_{y_2=0}^{y_2=P_2} = 0. \quad (9)$$

Для нижньої грані з врахуванням теплообміну з навколишнім середовищем з температурою $T_{\text{сеп}2}$ маємо умову:

$$\frac{\partial T_2}{\partial z_2} \Big|_{z_2=-r} = L^- = \frac{\beta}{\lambda_2} (T_2|_{z_2=-r} - T_{\text{сеп}2}). \quad (10)$$

Для верхньої грані підшарку аналогічно, врахувавши розміщення виводів, отримуємо:

$$\frac{\partial T_2}{\partial z_2} \Big|_{z_2=r} = L^+ = -\frac{\alpha_{T2}}{\lambda_2} (T_2|_{z_2=r} - T_{\text{сеп}2}) + \begin{cases} -\frac{P_{\text{вив}j}(t)}{\lambda_2 S_{\text{вив}j}}, \text{ при } (x_2, y_2) \in S_{\text{вив}j}, \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases} \quad (11)$$

Будемо знаходити температурне поле підшарку, в початковий момент часу для якого виконується умова:

$$T_2(x_2, y_2, z_2, 0) = T_2^0. \quad (12)$$

Для визначення невідомих величин потужностей виводів $P_{\text{вив}j}(t)$, використаємо інтегральну умову неперервності теплових потоків через виводи:

$$\iint_{S1_{\text{вив}j}} T_1(x_1, y_1, -h, t) dx_1 dy_1 = \iint_{S2_{\text{вив}j}} T_2(x_2, y_2, r, t) dx_2 dy_2 + \frac{h_{\text{вив}}}{\lambda_{\text{вив}j}} P_{\text{вив}j}(t), \quad (13)$$

де $S1_{\text{вив}i}$ та $S2_{\text{вив}i}$ – площа i -го виводу в області кристала та підшарку відповідно.

Отже, для аналізу нестационарних температурних полів МЕП з кристалом на жорстких

выводах потрібно розв'язати дві початково-крайові задачі у вигляді диференціальних рівнянь другого порядку в часткових похідних (3)-(7) для області кристала та (8)-(12) для області підшарку з врахуванням умов неперервності теплових потоків через виводи (13).

Розроблений метод базується на відшуканні функції у вигляді лінійної комбінації

$$T_1(x_1, y_1, z_1, t) = \sum_{j=0}^m \Theta_j(x_1, y_1, t) \cdot z_1^j.$$

Суть наведеного методу зводиться до відшукування 2-х невідомих функцій від 3-х змінних, комбінацією яких знаходимо функцію температурного розподілу

$$T_1(x_1, y_1, z_1, t) = \Theta_0(x_1, y_1, t) + z_1 \cdot \Theta_1(x_1, y_1, t).$$

Схема методу складається з таких кроків:

- приведення диференціального рівняння другого порядку до системи двох диференціальних рівнянь з виключенням змінної z і задоволенням граничних умов по z ;
- отримання розв'язків у вигляді тригонометричних рядів Фур'є за власними функціями задачі відокремлення змінних по x та y ;
- розв'язування з допомогою перетворення Лапласа системи диференціальних рівнянь першого порядку з початковими умовами для відшукування коефіцієнтів Фур'є двох функцій, які задають лінійний розклад шуканої функції температури за змінною z ;
- знаходження потужностей відведення тепла через виводи із умов неперервності теплових потоків через виводи.

Перші три кроки схеми застосовуються аналогічно і для підшарку.

У результаті застосування комбінації аналітичних та числових методів та припущення лінійного розкладу функції температури по z отримуємо аналітичну залежність за просторовими змінними в дискретні моменти часу. Невідомі функції, що апроксимують шукану функцію температур лінійно за змінною аплікату, наводяться у вигляді тригонометричних рядів Фур'є за власними функціями задачі відокремлення змінних по x та y та функціях розв'язань системи двох диференціальних рівнянь з початковими умовами, які знаходяться операторним методом перетворення Лапласа.

За допомогою числових методів обчислюються потужності відведення тепла через виводи та коефіцієнти ряду Фур'є за часовою змінною. Потужності виводів знаходяться зі системи інтегральних рівнянь, яка формується на основі умови (13). Систему інтегральних рівнянь розмірності, що дорівнює кількості жорстких виводів, розв'язуємо швидкозбіжним методом послідовних наближень. Значення знайдених коефіцієнтів ряду Фур'є за часовою змінною знаходяться методом числового інтегрування.

В обчислювальній схемі визначення нестационарних температурних полів найбільш ресурсомісткими та складним є обчислення потужностей тепловиділення через жорсткі виводи, які знаходяться з такої системи інтегральних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{11} \int_0^t P_{\text{вив1}}(\tau) \varphi_{11}(t, \tau) d\tau + \sigma_{12} \int_0^t P_{\text{вив2}}(\tau) \varphi_{12}(t, \tau) d\tau + \dots + \sigma_{1k} \int_0^t P_{\text{вивk}}(\tau) \varphi_{1k}(t, \tau) d\tau = P_{\text{вив1}}(t) + \delta_1(t) \\ \sigma_{21} \int_0^t P_{\text{вив1}}(\tau) \varphi_{21}(t, \tau) d\tau + \sigma_{22} \int_0^t P_{\text{вив2}}(\tau) \varphi_{22}(t, \tau) d\tau + \dots + \sigma_{2k} \int_0^t P_{\text{вивk}}(\tau) \varphi_{2k}(t, \tau) d\tau = P_{\text{вив2}}(t) + \delta_2(t) \\ \dots \dots \dots \\ \sigma_{k1} \int_0^t P_{\text{вив1}}(\tau) \varphi_{k1}(t, \tau) d\tau + \sigma_{k2} \int_0^t P_{\text{вив2}}(\tau) \varphi_{k2}(t, \tau) d\tau + \dots + \sigma_{kk} \int_0^t P_{\text{вивk}}(\tau) \varphi_{kk}(t, \tau) d\tau = P_{\text{вивk}}(t) + \delta_k(t) \end{array} \right.$$

Запропонована модель може бути використана базовою для моделювання температурних полів в одному з шарів в багат шарових конструкціях.

У **четвертому розділі** розглянуто архітектуру та організацію системи теплового аналізу ТАФС, особливості її реалізації.

Визначено основні функції незалежних компонентів програмної системи температурного аналізу: препроцесора, процесора, постпроцесора, бази даних.

Розроблена інформаційна модель МЕР зазначеного типу як об'єкта теплового проектування (рис.3) характеризується цілісністю, незалежністю від цілей температурного аналізу.

Інформаційна модель об'єкта проектування дає можливість описувати об'єкти широкого класу МЕР із кристалами на жорстких виводах з можливістю врахування розвитку різних способів тепловідведення. Реалізований гнучкий інтерфейс користувача системи ТАФС, автоматична побудова масиву жорстких виводів спроможні звільнити користувача від необхідності формувати вручну усі необхідні вхідні дані для алгоритму температурного аналізу, що суттєво спрощує процес моделювання. Організація зв'язків між користувачем та моделюючою частиною системи у вигляді розробленого інтерфейсу відповідає необхідним вимогам наочності, простоти та зручності у використанні для користувачів різних рівнів підготовки. Описані способи перевірки вхідних даних на коректність усувають помилкові ситуації в роботі температурного процесора.

П'ятий розділ відображає результати практичного застосування розробленої системи температурного аналізу та використання отриманих результатів досліджень у процесі формування рекомендації стосовно забезпечення необхідного температурного режиму.

Рис.3. Інформаційна модель об'єкта температурного аналізу

Для перевірки достовірності розроблених моделей та методів температурного аналізу проведено моделювання температури для тестових конструкцій простішої структури, які є окремими випадками досліджуваного об'єкта. Порівняння отриманих результатів з даними, отриманими при використанні інших методів аналізу, показало високу точність (до 5 %) запропонованого методу та малу його ресурсомісткість. Для тестових конструкцій кристалів МЕП на жорстких виводах, описаних в літературі, проведено моделювання нестационарних та стаціонарних температурних полів. Отримані результати звірені з даними, отриманими з описаних експериментів. Порівняння результатів температурного аналізу розробленими методами з даними, отриманими при використанні інших методів аналізу, показало високу точність запропонованого методу (до 12 % залежно від конструкції) та малу ресурсомісткість порівняно з іншими відомими системами теплового моделювання, які базуються на числових та аналогових методах температурного аналізу.

Для аналізу нестационарного температурного режиму тестовою структурою був взятий кремнієвий кристал ($\lambda=120$ Вт/°С·м, $c=700$ Дж/кг·°С, $\rho=1330$ кг/м³) розмірами 4×3,6×0,3 мм, установлений за допомогою жорстких виводів, вироблених зі сплаву ($\lambda=40$ Вт/°С·м, $c=376$ Дж/кг·°С, $\rho=8850$ кг/м³) на керамічний підшарок ($\lambda=135$ Вт/°С·м, $c=1002$ Дж/кг·°С, $\rho=3500$ кг/м³) розмірами 16×8×0,5 мм. Вісім жорстких виводів, кожен розмірами 0,2×0,2×0,2 мм, розміщені по периметру кристала на відстані 0,1 мм від краю кристала. Плоске джерело тепла розмірами 2×1,8 мм потужності 1 Вт розміщене в центрі нижньої грані кристала. Нижня поверхня підшарку є ізотермічною і має температуру 15 С. Решта поверхонь структури взаємодіє (коефіцієнт теплообміну 15 Вт/°С·м²) зі середовищем, температура якого 20 °С.

Результати аналізу (рис.4) відображають швидкість наростання температури, яка в області жорстких виводів є більшою, ніж в активній області кристала.

Рис.4. Температурні профілі при значенні $X=1.8$ мм

Як показали результати аналізу температурних полів, залежно від конструкції висока швидкість наростання температури в часі, а також температурні градієнти в області жорстких виводів можуть виявитися причинами виникнення внутрішніх сил, спроможних привести до руйнування конструкції. Кінцевим завданням теплового проектування є забезпечення нормального температурного режиму і уникнення руйнуючих факторів. Для постановки такої задачі використовуються результати аналізу стаціонарних та нестационарних температурних полів.

Результатом задачі забезпечення необхідного температурного режиму є формування рекомендації – який параметр потрібно змінити в межах допустимого, щоб забезпечити заданий температурний режим. По суті розв’язування цієї задачі зводиться до перебирання великої кількості варіантів конструкції і багаторазовий аналіз температурних полів. Розроблена система вибору значень параметрів конструкції полягає в автоматичному створенні області пошуку можливих варіантів умов тепловідведення з конструкції і дає можливість зменшити кількість переборів різноманітних варіантів конструктивного виконання пристрою. Для створення області пошуку використані результати дослідження теплових режимів МЕР з кристалами на жорстких виводах, які дозволили виробити систему типових рішень для пониження теплового опору конструкції.

Оскільки забезпечення заданого температурного режиму полягає в багаторазовому розв’язанні задачі аналізу, то саме швидкість та точність методу аналізу визначають обчислювальну складність процедури вибору теплофізичних та конструктивних параметрів конструкції МЕР.

Вхідними даними процедури вироблення рекомендації є опис базової конструкції МЕР з кристалами на жорстких виводах, список контрольованих параметрів, згідно з якими буде забезпечуватися необхідний температурний режим та список параметрів вибору. Опис базової конструкції задає початкові значення всіх даних, що описують конструкцію, для якої буде здійснюватися температурний аналіз. Список контрольованих параметрів задає умову перевірки допустимого температурного режиму. Це може бути значення допустимої температури та можливе відхилення або масив заданих точок кристала та значень температури в них. У першому випадку умовою перевірки є співставлення максимальної температури конструкції з допустимою, в іншому – отриманих із заданими значеннями температур в описаних точках конструкції. Список параметрів вибору задають область пошуку стосовно вироблення рекомендації для пониження теплового опору конструкції.

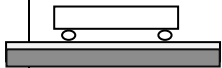
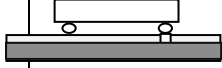
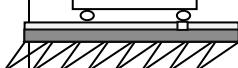

Результати, за якими можна рекомендувати потрібний температурний режим, представлені в табл. 1. Ці дані дозволяють оцінити кількісно тем-пературний режим для конструкцій МЕР з кристалом, установленим на жорсткі виводи для різних варіантів тепловідведення.

Вироблені рекомендації дозволяють для забезпечення необхідного температурного режиму конструкції знайти початкове проектне рішення в загальному процесі проектування МЕР з кристалами на жорстких виводах.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика засобів тепловідведення

| <i>№</i> | <i>Схема конструкції</i> | <i>Рекомендація стосовно умов тепловідводу</i> | <i>Максимальна температура, °С</i> |
|----------|--------------------------|--|------------------------------------|
|----------|--------------------------|--|------------------------------------|

| | | | |
|---|---|--|-------|
| 1 |  | Один тип виводів (20 шт.). Конвективний теплообмін підшарку та пасивної поверхні кристала зі середовищем | 310 |
| 2 |  | Два типи виводів (по 10 шт.). Конвективний теплообмін підшарку та пасивної поверхні кристала зі середовищем | 263,0 |
| 3 |  | Два типи виводів (по 10 шт.). Ізотермічність нижньої поверхні підшарку ($T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) | 30,9 |
| 4 |  | Два типи виводів (по 10 шт.). Ізотермічність верхньої поверхні кристала ($T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) | 19,0 |

У додатках наведено акти про впровадження результатів дисертаційної роботи та деякі проміжні математичні формули, які використовувалися для обчислення теплових потоків та температурних полів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертації наведено нове вирішення наукової задачі підвищення ефективності аналізу стаціонарних та нестаціонарних тривимірних температурних полів в МЕП з кристалами на жорстких виводах на основі більш точного врахування в аналітичній моделі теплообміну МЕП конструктивних та теплофізичних характеристик тепловідвідних елементів та побудови нової математичної моделі тривимірних нестаціонарних температурних полів, яка дозволяє застосувати аналітико-числовий метод температурного аналізу для отримання теплових потоків та температурних розподілів з достатньою адекватністю та точністю.

При цьому отримані такі теоретичні та практичні результати:

1. Знято ряд конструктивних та теплофізичних обмежень в аналітичній моделі стаціонарних температурних полів для МЕП з кристалами на жорстких виводах, завдяки чому досягнуто підвищення точності моделювання процесів теплообміну в МЕП цього типу до 25 відсотків залежно від конструкції.

2. Побудована нова математична модель тривимірних нестационарних температурних полів МЕП з кристалами на жорстких виводах у вигляді двох зв'язаних задач теплопровідності, яка дозволяє із застосуванням аналітико-числового методу знайти теплові потоки через жорсткі виводи, температурні поля та температурні градієнти в довільній точці незалежно від інших точок конструкції в дискретні моменти часу.

3. На основі відомого аналітичного методу обчислення двовимірних температурних полів, який полягає у апроксимації шуканої функції температур у вигляді лінійної комбінації двох інших розроблено новий аналітично-числовий метод аналізу нестационарних температурних полів МЕП з кристалами на жорстких виводах, застосування якого дозволило при забезпеченні високої точності переважати відомі методи за обсягом обчислень, що дозволяє ефективно використовувати запропонований підхід в задачах САПР.

4. Розроблено процедуру формування рекомендації стосовно вибору параметрів типових способів тепловідведення, яка дозволяє оперативно отримувати відповідні варіанти конструкцій на основі аналізу автоматично створеної області пошуку, що може бути використано на етапі початкового проектного рішення.

5. Проведено дослідження впливу окремих елементів конструкції МЕП з кристалами на жорстких виводах на формування стаціонарних та нестационарних температурних полів запропонованими методами аналізу температурних полів. На основі цього створено бібліотеку типових варіантів рішень тепловідведення в МЕП з кристалами на жорстких виводах.

6. Створено програмну систему математичного моделювання та аналізу температурних полів МЕП з кристалами на жорстких виводах, яка забезпечує автоматичне задання модельних конструкцій, перевірку коректності їх опису, використання типових конструкцій МЕП з кристалами на жорстких виводах як базових у модельних експериментах.

7. Наукові та практичні результати дисертації впроваджені на Львівському державному заводі “ЛОРТА” для аналізу температурних полів МЕП та в навчальному процесі для підготовки спеціалістів за спеціальністю “Комп’ютерні технології проектування” в Національному університеті “Львівська політехніка”.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федасюк Д.В., Левус Є.В. Моделювання та дослідження теплових режимів МЕП з встановленими кристалами ІС на жорсткі виводи // Вісник Держуніверситету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 1998. – №327. – С.138-148.

2. Федасюк Д. В., Петров Д. В., Левус Є. В. Застосування теплоелектричної аналогії в тепловому моделюванні МЕР // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1998. – № 352. – С.42-51.
3. Федасюк Д. В., Левус Є. В., Петров Д. В. Моделювання та забезпечення теплових режимів кристалів ІС установлених на жорсткі виводи // Технічні вісті. – 1999. – №1(8), 2(9). – С.74–77.
4. Федасюк Д. В., Петров Д. В., Левус Є. В. Аналіз сучасних систем теплового моделювання МЕР // Вісник Державного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1999. – №387. – С.398–403.
5. Левус Є. В., Федасюк Д. В. Аналіз нестационарних процесів теплообміну в МЕР з кристалом на жорстких виводах // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2001. – №398. – С.143–149.
6. Петров Д. В., Федасюк Д. В., Левус Є. В. Тепловий аналіз МЕР із кристалами на жорстких виводах у середовищі Internet // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2001. – №415. – С.164-171.
7. Федасюк Д., Левус Є., Назар Ю. Система теплового моделювання кристалів ІС на жорстких виводах // Зб.наукових праць "Сучасні проблеми в комп’ютерних науках". – Львів. – 2000. – С.122–126.
8. Fedasyuk D., Levus E., Petrov D. Flip-Chip Structure Transient Thermal Model // Microelectronics Reliability Journal.– 2001. – №41. – P.1965–1970.
9. Левус Є., Федасюк Д. Архітектура та функціонування системи теплового моделювання ТАFC // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2002. – №444. – С.109–116.
10. Федасюк Д. В., Левус Е.В., Петров Д.В. Конструктивные методы обеспечения тепловых режимов в кристаллах ИС, установленных на жесткие выводы // Информационные технологии в проектировании и производстве. –2002. – №2. – С.51–57.
11. Левус Є. Навчально-дослідницька система моделювання температурних полів кристалів ІС, встановлених на жорсткі виводи// Тези науково-методичної конференції “Комп’ютерне проектування в навчальному процесі”. – Львів. - 1998. – С.25–26.
12. Федасюк Д. В., Левус Є. В. Забезпечення теплових режимів кристалів ІС з жорсткими виводами // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції “Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці”. – Львів. – 1999. – С.62–63.
13. Fedasyuk D., Levus E., Petrov D. Transient thermal simulation of the flip-chip structure // Proceeding of the 7th International Conference “Mixed Design of Integrated Circuits and System” (MIXDES’2000). –

Gdynia (Poland). – 2000. – P.543–545.

14. Fedasyuk D., Petrov D., Levus E. Web-Based Thermal Simulator for Flip-Chip Structures WebTAFC // Proceedings of the 8th International Conference “Mixed Design of Integrated Circuits and Systems” (MIXDES’2001). – Zakopane (Poland). – 2001. – P.267–290.

15. Федасюк Д., Левус Є. Комп’ютерне моделювання та забезпечення температурних режимів мікроелектронних пристроїв з кристалами встановленими на жорсткі виводи// Матеріали Міжнародної конференції з індуктивного моделювання (МКІМ2002). – Том 3. – Львів. – 2002. – С.335–341.

АНОТАЦІЯ

Левус Є. В. Методи та засоби теплового проектування МЕП з кристалами на жорстких виводах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2002.

Дисертація присвячена питанням автоматизації теплового проектування мікроелектронних пристроїв, виготовлених за сучасною перспективною технологією – встановлення кристала на жорсткі виводи. У дисертаційній роботі вирішено важливу задачу підвищення ефективності теплового проектування мікроелектронних пристроїв з кристалами на жорстких виводах на основі створення та розвитку математичних моделей, методів та алгоритмів температурного аналізу. Розроблена автором система теплового проектування мікроелектронних пристроїв з кристалами на жорстких виводах забезпечує ефективне вирішення актуальних задач теплового проектування: тривимірний стаціонарний та нестаціонарний температурний аналіз МЕП та формування рекомендації для забезпечення необхідного температурного режиму. Основні результати роботи впроваджено на промисловому підприємстві при проектуванні МЕП та в навчальному процесі.

Ключові слова: мікроелектронний пристрій з кристалами на жорстких виводах, теплове проектування, теплова модель, теплообмін, метод температурного аналізу.

АННОТАЦИЯ

Левус Е. В. Методы и средства теплового проектирования МЕУ с кристаллами на жестких выводах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Национальный университет “Львовская политехника”. – Львов, 2002.

Диссертация посвящена вопросам автоматизации теплового проектирования микроэлектронных устройств с кристаллами на жестких выводах. В диссертационной работе решена важная задача повышения эффективности теплового проектирования микроэлектронных устройств с кристаллами на жестких выводах на основе создания и развития математических моделей, методов и алгоритмов температурного анализа.

Разработанная автором система теплового проектирования микроэлектронных устройств с кристаллами на жестких выводах обеспечивает эффективное решение актуальных задач теплового проектирования: трехмерный стационарный и нестационарный температурный анализ МЭУ и формирование рекомендации для обеспечения необходимого температурного режима.

В ходе решения задач, поставленных в диссертационной работе, получены такие результаты:

1. Снято ряд конструктивных и теплофизических ограничений в аналитической модели стационарных температурных полей для МЭУ с кристаллами на жестких выводах, благодаря чему достигнуто повышение точности моделирования процессов теплообмена в МЭУ этого типа на 5-25 % в зависимости от конструкции.

2. Построена новая математическая модель трехмерных нестационарных температурных полей МЭУ с кристаллами на жестких выводах в виде двух связанных задач теплопроводности, которая разрешает с применением аналитико-числового метода найти тепловые потоки через жесткие выводы, температурные поля и температурные градиенты в произвольной точке независимо от других точек конструкции в дискретные моменты времени.

3. На основе известного аналитического метода исчисления двумерных температурных полей, который состоит в аппроксимации искомой функции температур в виде линейной комбинации двоих других, разработан новый аналитическо-численный метод анализа нестационарных температурных полей МЭУ с кристаллами на жестких выводах, применение которого разрешает при обеспечении высокой точности превзойти известные методы по объему исчислений, что разрешает эффективно использовать предложенный подход в задачах САПР.

4. Разработана процедура формирования рекомендации относительно выбора параметров типичных способов теплоотвода, которая разрешает оперативно получать соответственные варианты конструкции на основе анализа автоматически созданной области поиска, что может использоваться на этапе начального проектного решения.

5. Проведено исследование влияния отдельных элементов конструкции МЭУ с кристаллами на жестких выводах на формирование стационарных и нестационарных температурных полей разработанными методами анализа температурных полей. На этой основе создана библиотека типичных вариантов решений теплоотвода в МЭУ с кристаллами на жестких выводах.

6. Создано программную систему математического моделирования и анализа температурных полей МКУ с кристаллами на жестких выводах, которая обеспечивает автоматическое задание модельных конструкций, проверку корректности их описания, использование типичных конструкций МКУ с кристаллами на жестких выводах как базовых в модельных экспериментах.

7. Научные и практические результаты диссертации внедрены на Львовском государственном заводе “ЛОРТА”, а также в учебном процессе для подготовки специалистов по специальности “Компьютерные технологии проектирования” в Национальном университете “Львовска политехника”.

Ключевые слова: микроэлектронное устройство с кристаллами на жестких выводах, тепловое проектирование, тепловая модель, теплообмен, метод температурного анализа.

ABSTRACT

Levus E. V. Methods and tools of thermal design system of Flip-Chip devices. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree by specialty 05.13.12 – Computer Aided Design Systems. – Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2002.

This dissertation addresses the problems of thermal design of microelectronic devices (MEDs) that use modern flip chip device technology. The important task of increasing effectiveness of thermal design of MEDs with flip chip devices was accomplished in this dissertation by creating and developing mathematic models, methods and algorithms for temperature analysis. The system of thermal design of MED flip chip devices developed by the author provides an effective solution for topical tasks of thermal design: three-dimensional stationary and non-stationary MED thermal analysis and development of recommendations for providing the necessary temperature performance. The main results of this study have been introduced at an industrial plant for designing MEDs and are used in the educational process.

Keywords: Flip-Chip device, thermal design, thermal model, heat exchange, method of temperatures analysis.