

На правах рукопису

ХАЛАВКА
Андрій Іванович

РОЗРОБКА БІПОЛЯРНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ
НА ОСНОВІ ЯВИЩ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ

Спеціальність: 05-27.01 — Твердотільна електроніка
(включаючи функціональну)

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



Львів — 1997

АВ 37.067

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Електронні прилади" Державного університету "Львівська політехніка".

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Готра З.Ю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дружинін А.О.
доктор технічних наук, професор
Політанський Л.Ф.

Провідна організація - Львівський науково-дослідний
радіотехнічний інститут, м.Львів

Захист відбудеться 4 квітня 1997 р. о 15⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.06.18 при Державному університеті "Львівська політехніка" (290646, м.Львів, вул. С.Бандери, 12, ауд. 124 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "3" Березня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради



Р.І.Байдар

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751685 (W)

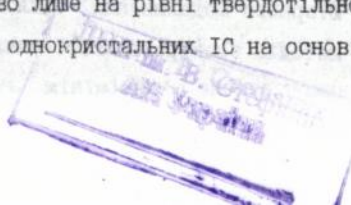
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і ступінь дослідженості тематики дисертації. Малі розміри та відносно низька ціна напівпровідникових інтегральних схем (ІС) обумовили стрімке розширення областей застосування радіоелектронних засобів і електронного обладнання, складність якого неперервно зростає. Для підвищення апаратурної густини пакування необхідний ріст ступеня інтеграції ІС. Труднощі мікромініатюризації пристроїв при дуже низьких частотах загальновідомі і пов'язані з принциповою обмеженістю діапазону номіналів конденсаторів і резисторів у складі твердотільних ІС та неможливістю досягнення за допомогою інтегральних RC-структур великих постійних часу. Тому на практиці ІС діапазону низьких частот вимагають застосування зовнішніх (навісних) елементів.

Еквівалент реактивності великого номіналу може бути досягнений використанням інерційності теплопереносу в кристалах ІС. Це дає можливість створення повністю однокристальних мікроелектронних пристроїв (МЕР) діапазону низьких частот - фільтрів, генераторів, вибірних підсилювачів тощо - та спрощення схемотехнічного забезпечення їх функціонування.

Відомі приклади реалізації інтегральних схем на основі явищ теплопереносу методами гібридної мікроелектроніки. Однак, подальше розширення функцій, ускладнення шляхів покращення характеристик вказаних пристроїв обмежене порівняно великим енергоспоживанням, низькою технологічністю і надійністю, їх високою собівартістю.

Вирішити вказані проблеми, розширити спектр функціонального призначення можливо лише на рівні твердотільної інтеграції. Отже, розробка однокристальних ІС на основі явищ



теплопереносу, а саме - елементної бази, схемотехніки, САПР, технології виготовлення - є актуальною задачею.

Дисертаційне дослідження є складовою частиною комплексної науково-технічної програми з пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки ДКНТ України (проект 05.44.02/053-92-95).

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні однокристалних ІС на основі явищ теплопереносу, що забезпечують мінімальне енергоспоживання та розміри, високу технологічність, надійність та відповідають вимогам до елементної бази електронної апаратури нового покоління.

Основні завдання наукових досліджень:

- розроблення принципів побудови та шляхів мінімізації енергоспоживання твердотільних ІС на явищах теплопереносу;

- оптимізація топології, вибір конструкції та дослідження характеристик інтегральних теплопар, які конструктивно і технологічно сумісні з елементами біполярних ІС;

- побудова моделей структур напівпровідникових ІС з врахуванням явищ теплопереносу та спряження їх з програмно-методичним комплексом (ІМК) PSpice;

- розроблення уніфікованих інтегральних МЕР на основі явищ теплопереносу, які забезпечують функціональну та параметричну гнучкість систем на їх основі.

Характеристика методології, методу дослідження предмету і об'єкту. Об'єктом наукових досліджень були структури та елементи напівпровідникових ІС. Дослідження, спрямовані на вирішення поставлених завдань, базувалися на використанні методів фізики напівпровідників, математичного та комп'ютерного моделювання теплових процесів та електронних кіл, методів електротеплової аналогії, методів перетворень

Лапласа. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів забезпечувалась коректністю проведених розрахунків, результатами імітаційних моделювань і експериментальних досліджень структур ІС на основі явищ теплопереносу, перевіркою функціонування виготовлених макетів пристроїв.

Наукова новизна роботи:

- розроблені моделі структур біполярних ІС з врахуванням явищ теплопереносу для побудови нового класу схем;

- розроблено ряд однокристальних біполярних ІС діапазону низьких частот, в яких вперше запропонована заміна RC-структури на зосереджену теплоелектричну систему, проведено кореляцію їх параметрів з конструктивно-технологічними факторами;

- розроблена нова, суміщена, структура теплопар, яка забезпечує в однокристальній ІС суттєве зменшення паразитних термовпливів від елементів теплопередачі та підвищення ступеня інтеграції;

- методом електротеплової аналогії проведено адаптацію математичних моделей явищ теплопереносу для ПМК PSpice, що забезпечило можливість схемотехнічного моделювання інтегральних схем з врахуванням теплових зв'язків.

На захист виносяться:

- встановлені закономірності зміни фазового зсуву в інтегральних теплопарах;

- спосіб стабілізації параметрів однокристальних ІС на основі явищ теплопереносу за теплоелектричними характеристиками теплопар;

- диференційні схеми теплового збудження двотактної дії, які за рахунок відсутності постійної складової процесу теплопередачі забезпечують мінімізацію енергоспоживання ІС

на основі явищ теплопереносу;

- ряд нових однокристальних біполярних ІС на основі явищ теплопереносу, які забезпечують спрощення схемотехнічного забезпечення їх функціонування.

Практична цінність дисертаційної роботи:

- розроблено конструкцію інтегральних теплопар, що у складі однокристальних біполярних ІС забезпечують мінімальні теплові потужності за рахунок граничного зменшення геометричних розмірів шляхом інтеграції у одній структурі нагрівного і термочутливого елементів інтегральної схеми;

- доведено можливість практичної реалізації однокристальних частотних фільтрів з частотою зрізу 0,2-1 Гц;

- теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість побудови однокристальних схем генераторів сигналів низької частоти з періодом генерації 0,01-10 с;

- розроблено алгоритм і програмне забезпечення для здійснення комплексного моделювання теплоелектричних режимів ІС на основі ПМК PSpice.

Реалізація і впровадження результатів досліджень. Результати роботи впроваджені у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті та Учбово-науково-виробничому центрі при Одеському державному університеті, що підтверджено відповідними актами. Об'єкти впровадження - теплокерований операційний підсилювач та вузли систем автоматичного регулювання підсилення (АРП) з теплоелектричним зворотнім зв'язком. Економічний ефект від впровадження складає 22,8 коп на одну інтегральну схему.

Апробація. Основний зміст і результати роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми автоматизованої розробки і ви-

робництва радіоелектронних засобів та підготовки інженерних кадрів" (Львів, 1994); Науково-технічній конференції "Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки" (Львів, 1995); Міжнародній науковій конференції, присвяченій 150-річчю від дня народження І.Пулюя (Львів, 1995); I Національній науковій конференції "Інформатика: теорія, технологія, техніка - ІТТТ-95" (Одеса, 1995); V Міжнародній науково-практичній конференції "Україномовне програмне забезпечення - УКРООТ-95" (Львів, 1995); I-st International Modelling School (Alushta, 1996); XVIII, XIX and XX Annual Conference of ISHM- Poland (Warsaw, 1994; Pogabka-Kozubnic, 1995; Jurata, 1996).

Публікації. Результати виконаних досліджень відображені у 14 друкованих роботах, у т.ч. 4 заявках на винаходи.

Конкретна особиста участь автора в одержанні наукових результатів, викладених у дисертації, полягає у самостійній розробці принципів побудови, схемотехніки вузлів ІС, математичному моделюванні структур ІС з врахуванням явищ теплопереносу та спряженні розроблених моделей з ПМК PSpice, постановці та проведенні експериментів. Розробка схем пристроїв та їх дослідження виконані у співавторстві згідно наведеного списку літератури. Усі висновки і положення, що складають суть дисертації, сформульовані автором особисто.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Основний зміст роботи викладений на 162 сторінках друкованого тексту, ілюстрованого 44 рисунками і 4 таблицями. Список літератури містить 130 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність проблеми, формулюються мета і завдання досліджень, наукова новизна та положення, що виносяться на захист, вказана практична цінність та реалізація результатів досліджень.

У першому розділі проаналізовано проблему створення однокристальних ІС на основі явищ теплопереносу. Основним елементом таких схем є теплопара, що конструктивно поєднує джерело тепла (нагрівник) і термочутливий елемент (ТЧЕ) з заданим часом теплової релаксації. Розглянуто два основні механізми теплопереносу в напівпровідникових ІС – внутрішній і зовнішній. У першому випадку каналом теплопередачі в кристал ІС, при цьому частотні характеристики пристроїв обумовлюються геометрією кристалу. У другому випадку вихідний сигнал визначається параметрами оточуючого середовища. На основі аналізу літературних даних сформульовані завдання дисертаційної роботи.

В заключній частині розділу обґрунтовано можливість виготовлення сенсорних пристроїв на основі явищ теплопереносу.

У другому розділі здійснено побудову математичних моделей структур ІС з врахуванням явищ теплопереносу, розроблено алгоритм та програмне забезпечення для розрахунку теплоелектричних режимів ІС за допомогою ПМК PSpice.

Функція передачі інтегральної теплопари розрахована з рівняння теплопровідності при відповідних крайових умовах. Тепловою моделлю кристалу був багат шаровий паралелепіпед з теплоізолюваними бічними поверхнями. Отримано вираз для термічного коефіцієнта передачі у вигляді:

$$F(s) = \frac{T(s)}{P(s)} = \frac{4}{C} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{H_{nm} \cdot S_{nm}}{(\delta_n + 1) \cdot (\delta_m + 1) \cdot [s + \omega_{nm}]}, \quad (1)$$

де s - комплексна частота; T - температура ТЧЕ; P - потужність, розсіяна на нагрівнику; C - теплоємність кристалу ІС; H_{nm} і S_{nm} - коефіцієнти розкладу в ряд Фур'є функцій розподілу нагрівника і ТЧЕ по поверхні кристалу; ω_{nm} - спектр власних частот, визначається структурою та геометрією кристалу. Досліджено вплив конструктивних параметрів на частотні характеристики. Експериментальні залежності та відповідні їм результати розрахунку згідно (1) амплітуди і фази як функції частоти та відстані між нагрівником і ТЧЕ зображені на рис. 1. Результати досліджень свідчать про наступне:

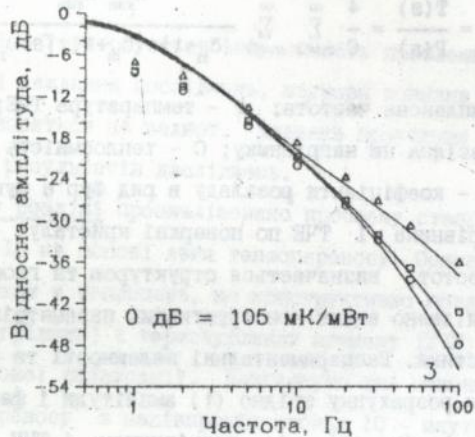
1. Теплові процеси в кристалах ІС характеризуються значною інерційністю - частота зрізу близька до 1 Гц.

2. Теплопари ІС забезпечують крутість спадання амплітудно-частотної характеристики, що характерна для RC схем.

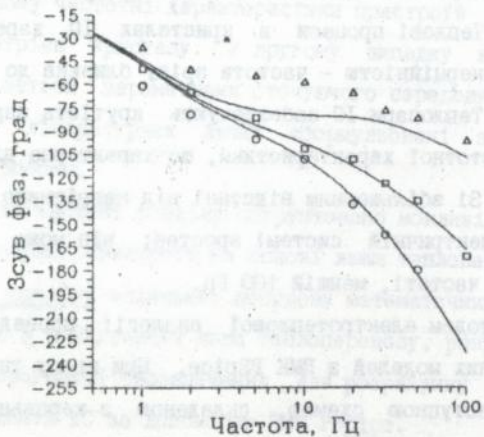
3. Зі збільшенням відстані від нагрівника фазовий зсув у теплоелектричній системі зростає; він може перевищувати -180° на частоті, меншій 100 Гц.

Методом електротеплової аналогії проведено спраження розроблених моделей з ПМК PSpice. При цьому теплопару заміняють заступною схемою, складеною з керованих джерел та RC-ланок, що реалізують засобами PSpice функцію (1). Розрахунок параметрів елементів заступної схеми проводять при допомозі розробленого пакету програм "ThermoSPICE", який є програмною оболонкою до програм PSpice.

Третій розділ присвячений розробленню елементної бази напівпровідникових ІС на основі явищ теплопереносу та нового багатопрофільного компонента - теплокерованого операційного



а)



б)

Рис. 1. Амплітудно-частотна (а) та фазово-частотна (б) характеристики теплопар ІС у корпусі типу 401.14-1 (суцільною лінією показано результати теоретичного розрахунку): 1 - 350 мкм; 2 - 700 мкм; 3 - 1050 мкм

підсилювача.

В основу елементної бази розроблених ІС на явищах теплопереносу покладено елементну базу біполярних ІС. Особлива увага звернена на конструкції інтегральних теплопар. Розроблено конструкції теплопар з ТЧЕ - транзисторами, які суміщають у собі нагрівний елемент. Застосування суміщених структур забезпечує в однокристальних схемах мінімізацію паразитних термовпливів від елементів теплопередачі, а відтак - можливість підвищення ступеня інтеграції.

З метою уніфікації вузлів ІС на основі явищ теплопереносу та підвищення універсальності розроблено новий багатопрофільний компонент - теплокерований операційний підсилювач (ТОП), що є основою для створення широкого спектру однокристальних МЕП діапазону низьких частот.

Функціональна схема ТОП зображена на рис. 2. Теплокерований операційний підсилювач - це напівпровідникова ІС, до складу якої, крім власне операційного підсилювача (ОП), вхо-

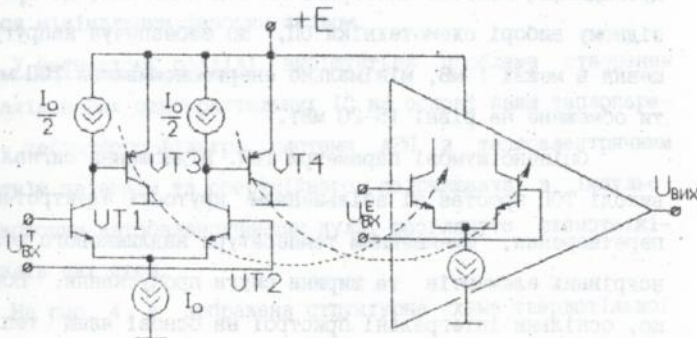


Рис. 2. Функціональна схема ТОП

дять схема теплового збудження елементів вхідного каскаду ОП. Профіль використання конкретного пристрою та його параметри визначаються резисторами зворотнього зв'язку.

Схема теплового збудження реалізована як диференціальна схема двотактною дії, що забезпечує мінімальний (нульовий) розігрів нагрівних елементів, а, отже, мінімальне енергоспоживання пристрою при відсутності вхідного сигналу ($U_{\text{вх}}^T = 0$).

З врахуванням сигналу $U_{\text{вх}}^E$, який подають безпосередньо на вхід ОП, вихідний сигнал ТОП запишемо у вигляді:

$$U_{\text{вих}} = K_T(s) \cdot K_E \cdot U_{\text{вх}}^T + K_E \cdot U_{\text{вх}}^E, \quad (2)$$

де $K_T(s)$ - параметр, що враховує частотну залежність теплових зв'язків; K_E - коефіцієнт підсилення ОП.

Аналіз (2) показує, що найменша зміна потужності, розсіяної на нагрівних елементах, призводить до суттєвої зміни вихідного сигналу. Мінімум допустиме значення теплової потужності на диференціальних термоперетворювачах визначається напругою зміщення операційного підсилювача ТОП. Проведені дослідження макетів інтегральних ТОП показали, що при відповідному виборі схемотехніки ОП, що забезпечує напругу зміщення в межах 1 мВ, мінімальне енергоспоживання ТОП може бути обмежене на рівні 15-20 мВт.

Оцінено шумові параметри ТОП. Відношення сигнал/шум на виході ТОП зростає зі збільшенням крутості електротеплового перетворення, зменшенням температури надлишкового розігріву нагрівних елементів та ширини смуги пропускання. Показано, що, оскільки інтегральні пристрої на основі явищ теплопереносу характеризуються вузькою смугою пропускання в діапазоні низьких частот, теплові шуми від елементів теплопередачі не є домінуючими і не впливають суттєво на роботу пристрою.

Співвідношення (2) в основним рівнянням, що описує роботу ТОП. Створення частотноселективних та імпульсних схем на основі ТОП передбачає застосування резисторів зворотнього зв'язку. Як приклад, на рис. 3, а наведено схему генератора імпульсів; результати досліджень залежності періоду імпульсів від R_1/R_2 для різних $K_T(0)$ зображені на рис.3,б. Результати досліджень показали, що спектр можливих значень періоду коливань генераторних схем на явищах теплопереносу має нижню межу; мінімальний період обернено пропорційний частоті f_{180} , на якій фазовий зсув на інтегральних теплопарах сягає -180° .

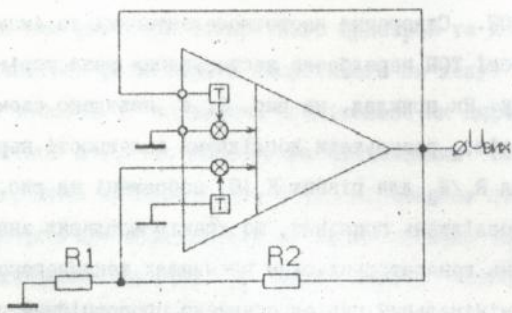
Проведені експериментальні дослідження виявили можливість самозбудження в ІС на основі явищ теплопереносу. Для забезпечення стійкості необхідне виконання умови (критерій стійкості):

$$\left| K_T(f_{180}) \cdot K_E \right| < 1. \quad (3)$$

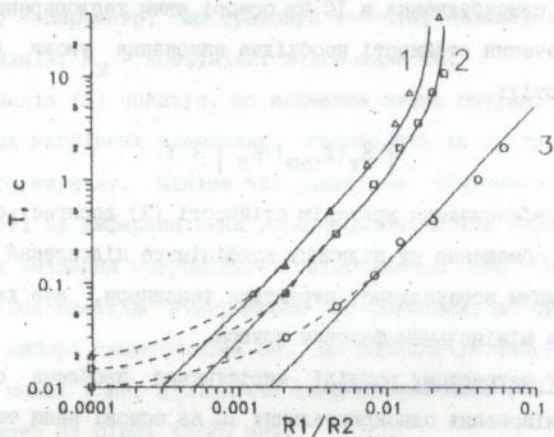
Забезпечення критерію стійкості (3) досягається накладанням обмеження на величину коефіцієнта підсилення та застосуванням зосередженої структури теплопари, яка характеризується мінімальним фазовим зсувом.

У четвертому розділі вирішується проблема створення спеціалізованих однокристальних ІС на основі явищ теплопереносу - частотного фільтра, системи АРП з теплоелектричним зворотнім зв'язком та операційного підсилювача з імпульсним тепловим автобалансуванням нуля, розглянуто схемотехніку вузлів цих схем.

На рис. 4, а зображена структурна схема твердотільної ІС частотного фільтра на основі явищ теплопереносу. В основу роботи схеми покладено стабілізацію коефіцієнта підсилення за теплоелектричними параметрами частотноселективної ланки



а)



б)

Рис. 3. Схема електрична (а) та залежність періоду імпульсів (б) генератора на основі ТОП від R_1/R_2 для різних K_{TO} : 1 - 0,015; 2 - 0,021; 3 - 0,130

на нульовій частоті. Фільтр містить два ідентичні канали, один з яких (основний канал 1) здійснює частотну обробку сигналу, а другий (допоміжний канал 2) використано для стабілізації коефіцієнта підсилення. На вхід допоміжного каналу подають постійну напругу $U_{оп}$. За допомогою внутрішнього ОП коефіцієнт підсилення керованих підсилювачів обох каналів встановлюється таким, щоб забезпечити одиничний коефіцієнт передачі у допоміжному каналі, а отже - одиничний коефіцієнт підсилення по постійному струму в основному каналі фільтра. Цим забезпечується висока температурна і часова стабільність характеристик та їх відтворюваність у процесі виготовлення.

В інших розроблених пристроях інерційність явищ теплопереносу застосована для симетрування входів метрологічних підсилювачів та автоматичного регулювання коефіцієнта підсилення. У першому випадку симетрування здійснюється періодичним перериванням з частотою, що лежить поза смугою пропускання підсилювача, і підстроюванням нуля вихідного сигналу імпульсним нагрівом диференційної пари входних транзисторів. При цьому вдається мінімізувати напругу зміщення. Як керуючий використано внутрішній генератор на основі ТОП. Оскільки постійна часу розбалансу вхідного каскаду підсилювача при імпульсному тепловому збудженні та період коливань керуючого генератора визначаються тими ж конструктивними параметрами кристалу схеми, забезпечується висока стабільність комутування у схемі операційного підсилювача з імпульсним тепловим автобалансуванням нуля при однокристальному виготовленні всіх компонентів.

Структурна схема системи АРП з теплоелектричним зворотнім зв'язком зображена на рис. 4, б. Вхідну напругу $U_{вх}$ подають на підсилювач 1 з керованим коефіцієнтом підсилен-

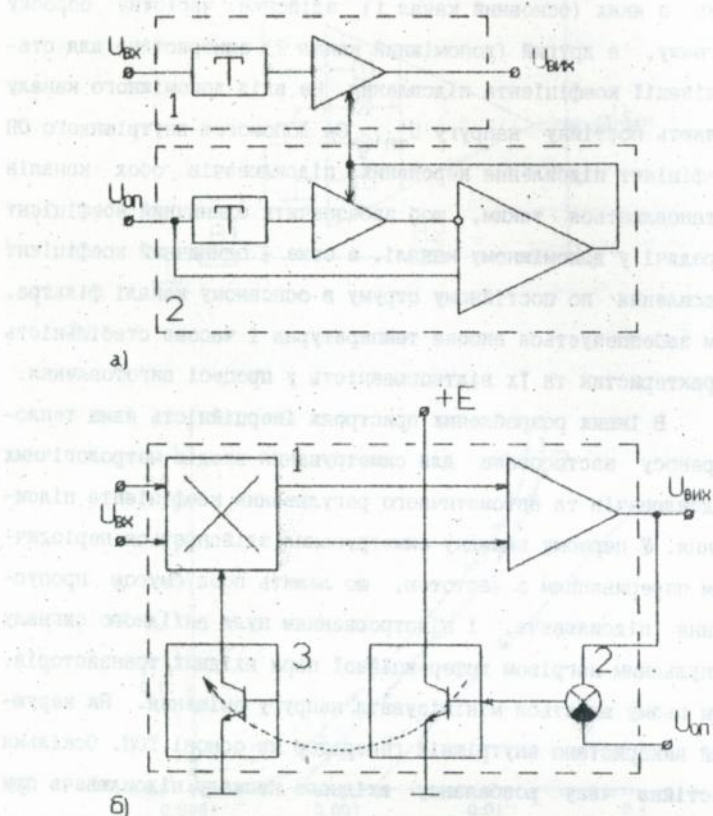


Рис. 4. Структурні схеми спеціалізованих однокристальних ІС на основі явищ теплопереносу: а - частотний фільтр з автостабілізацією коефіцієнта підсилення по постійному струму; б - система АРП з термоелектричним зворотнім зв'язком

ня. Вихідну напругу підсилювача $U_{\text{вих}}$ детектують амплітудним детектором 2. Напругу розбалансу, яка пропорційна різниці опорної напруги $U_{\text{оп}}$ (напруги затримки) і середнього значення вихідного сигналу, перетворюють у тепловий сигнал, який подають на керуючий елемент 3 і використовують для регулювання підсилення. Теплове інтегрування вихідного сигналу, застосоване в розробленій системі АРП, забезпечує її безконденсаторну реалізацію, що особливо важливо при однокристальному виготовленні.

У п'ятому розділі розглядаються технологічні особливості виготовлення однокристальних ІС на явищах теплопереносу. За основу вибрано технологію біполярних ІС з ізоляцією елементів зворотньо змішеним р-п переходом. У випадку, коли на частотну характеристику накладені обмеження, можливе формування каналів теплопередачі мезатехнологією, ізоляцією діелектриком чи окисдованим пористим кремнієм. Показано, що відповідним вибором способу теплоізоляції можна забезпечити практично неперервний спектр постійних часу в інтервалі $10^{-6} \dots 10^{-1}$ с.

Технологічний контроль якості структур ІС на основі явищ теплопереносу проводився на спеціально виготовленому тестовому кристалі. Кристал містить набір тестових структур, які забезпечують можливість комплексного дослідження впливів типу корпусу, інших конструктивних елементів мікросборки на характеристики теплопереносу в ІС.

В додатках наведено тексти програм, результати розрахунків частотних характеристик теплових зв'язків у кристалах напівпровідникових ІС та документи, які підтверджують впровадження виконаної роботи.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ І ВИСНОВКИ

У даній роботі викладено результати розробки напівпровідникових ІС на основі явищ теплопереносу. Вперше інерційність теплопереносу покладена в основу створення ряду однокристальних МЕС з розширеними функціональними можливостями.

У процесі вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі отримані наступні результати.

1. Розроблено математичні моделі структур твердотільних ІС на основі явищ теплопереносу та проведено їх спряження з пакетом схемотехнічного моделювання PSpice, що забезпечило можливість комплексного моделювання теплоелектричних режимів зазначеного типу схем.

2. Досліджено залежності фазового зсуву у теплоелектричній системі від конструктивних параметрів теплопар. Показано, що застосування теплопар, у яких нагрівний елемент суміщений з термочутливим, забезпечує можливість реалізації пристроїв на основі явищ теплопереносу з підвищеним запасом стійкості по фазі.

3. Розроблено конструкції теплопар з термочутливими елементами - транзисторами, які суміщають у собі нагрівний елемент. Застосування суміщених структур забезпечує зменшення паразитного термічного впливу від нагрівних елементів теплопар на інші елементи схеми і дозволяє підвищити ступінь інтеграції.

4. Запропоновано і розроблено диференційну схему теплового збудження двотактної дії, енергоспоживання якої мінімізоване за рахунок відсутності постійної складової процесу теплопередачі.

5. Розроблено новий багатопрофільний компонент ІС -

теплокерований операційний підсилювач, на основі якого запропоновано ряд частотоселективних та імпульсних пристроїв діапазону низьких частот.

6. Виявлено можливість самозбудження в ІС на основі явищ теплопереносу, при цьому частота генерації визначається параметрами елементів у колі зворотнього зв'язку; максимальною є частота, на якій фазовий зсув на інтегральних теплоперах сягає -180° .

7. Показано, що стабілізація коефіцієнта підсилення фільтрів на явищах теплопереносу за теплоелектричними параметрами частотоселективної ланки на нульовій частоті дозволяє підвищити температурну і часову стабільність характеристик схем та їх відтворюваність у процесі виготовлення.

8. Встановлено, що постійна часу розбалансу вхідного каскаду підсилювача при імпульсному тепловому збудженні та період коливань генератора на явищах теплопереносу визначаються тими ж конструктивними параметрами кристалу схеми, що дозволяє підвищити стабільність комутування у схемі операційного підсилювача з імпульсним тепловим автобалансуванням нуля при однокристалному виготовленні всіх компонентів.

9. Розроблено новий клас напівпровідникових ІС діапазону низьких частот, у яких для досягнення великої постійної часу і спрощення схемотехнічного забезпечення їх функціонування застосовано інерційність явищ теплопереносу: частотний фільтр з автостабілізацією коефіцієнта підсилення по постійному струму, систему АРЧ з теплоелектричним зворотнім зв'язком, операційний підсилювач з імпульсним тепловим автобалансуванням нуля.

Розроблені ІС на явищах теплопереносу вирішують проблему твердотільної інтеграції МЕР діапазону низьких частот.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Халавка А.І. Дослідження стійкості замкненої тепло-електричної системи // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання і керування. - 1996. - N 305. - С.78-81.

2. Система АРП з теплоелектричним зворотнім зв'язком / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І., Каліта В. // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання і керування. - 1996. - N 305. - С.75-78.

3. Моделювання теплоелектричних режимів інтегральних схем за допомогою пакету PSpice / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І., Каліта В. // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи проектування: теорія і практика. - 1996. - N 313. - С.104-110.

4. Заявка 94062528, Україна. МПК⁵ Н 01 L 29/52. Інтегральний транзистор / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І. Заявл. 02.06.94. Опубл. 29.09.95. Бюл. "Промисл. власність", N 3 (1995).

5. Заявка 94062529, Україна. МПК⁵ Н 01 L 29/44. Інтегральний діод / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І. Заявл. 02.06.94. Опубл. 26.12.95. Бюл. "Промисл. власність", N 4 (1995).

6. Заявка 94062530, Україна. МПК⁵ Н 01 L 29/40, 29/60. Інтегральний стабілітрон / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І. Заявл. 02.06.94. Опубл. 26.12.95. Бюл. "Промисл. власність", N 4 (1995).

7. Заявка 94086683, Україна. МПК⁵ Н 01 L 29/00, 29/68. Інтегральний резистор / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка

А.І., Бердник М.Я. Заявл. 18.08.94. Опубл. 29.03.96. Бжл. "Промисл. власність", N 1 (1996).

8. Модель теплового зв'язку для стандартних пакетів САПР / Готра З.Ю., Халавка А.І., Голяка Р.Л., Бердник М.Я. // Деп. в ДНТБ України 17.02.95, N 420 - Ук. 95. - 11 с.

9. Готра З.Ю., Халавка А.І., Голяка Р.Л. Однокристалний тепловий фільтр з електронним керуванням // Деп. в ДНТБ України 13.04.95, N 838 - Ук. 95. - 5 с.

10. Теплокерований ОП як елементна база нового покоління ІС на основі явищ теплопереносу / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Смеркло Л.М., Халавка А.І. // Деп. в ДНТБ України 20.06.95, N 1571 - Ук. 95. - 10 с.

11. Халавка А.І. Операційний підсилювач з тепловим автобалансуванням нуля // Деп. в ДНТБ України 20.06.95, N 1572 - Ук. 95. - 7 с.

12. Інтегральний частотний фільтр на основі явищ теплопереносу з автостабілізацією коефіцієнта підсилення по постійному струму / Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Смеркло Л.М., Халавка А.І. // Деп. в ДНТБ України 9.01.96, N 226 - Ук. 96. - 7 с.

13. Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.І. Детектор горизонтального положення в інтегральному виконанні // Інформаційний листок N 009-94. - Львів: ЦНТЕІ, 1994 р.

14. Thermal-controlled operational amplifier / Gotra Z., Kalita W., Khalavka A. et al. // Proc. 19-th Conf. of ISHM-Poland. Porabka-Kozubnic, September 17-20, 1995. - Wroclaw, 1996. - P.189-192.

Халавка А.И. Разработка биполярных интегральных схем на основе явлений теплопереноса. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника (включая функциональную). Государственный университет "Львівська політехніка", Львов, 1997.

Защищаются 14 научных работ, содержащих результаты теоретических и экспериментальных исследований явлений теплопереноса в структурах полупроводниковых ИС, а также возможности применения инерционности теплопередачи для создания однокристалльных устройств низкочастотного диапазона. Разработаны принципы построения, элементная база, схемотехника и САПР биполярных ИС на основе явлений теплопереноса, рассмотрены технологические особенности изготовления. Разработанные ИС на основе явлений теплопереноса решили проблему твердотельной интеграции микровоздушных устройств диапазона низких частот.

Khalavka A.I. Elaboration of bipolar integrated circuits on the basis of the heat-transfer process. Dissertation on search of the scientific degree of candidate of technical science by speciality 05.27.01 - Solid-state electronics (including functional). State university "Lviv Polytechnic", Lviv, 1997.

14 scientific publications which contain the results of theoretical and experimental investigations of heat-transfer process in semiconductor IC structures as well as possibility of the use of heat-transfer inertiativity for the creation of single-crystal low-frequency devices are being defended. The principles of creation, element basis, scheme-technique and CAD of the bipolar ICs on the basis of the heat-transfer process are elaborated, the technological peculiarities of performance are considered. The elaborated ICs on the basis of the heat-transfer process solved the problem of solid-state integration of microelectronic low-frequency devices.

Ключові слова: інтегральна схема, частотний фільтр, багатопрофільний компонент, канал теплопередачі, операційний підсилювач, теплове збудження.

Підписано до друку 19.02.97р. Формат 60х84/16.
Об'єм І друку. лист. Зам. 78. Тир. 100. Безплатно.

Львів. Личаківська, 3. Друкарня УАІ.

A 37.061

AB 37.061