

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

Осад

ОСАДЧУК ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.373.12

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ГАЗОЧУТЛИВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА ОСНОВІ
СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Спеціальність - 05.27.01 - твердотіла електроніка
і мікроелектроніка

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на одержання вченого ступеня кандидата
технічних наук

Київ - 1994

Роботою є рукопис.

Робота виконана на кафедрі мікроелектроніки Київського політехнічного інституту.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, академік АІНУ Ю. І. ЯКИМЕНКО

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії України ЧАЙКА Г.Є.

кандидат технічних наук, доцент

КОНДРАТОВ В.Т.

Ведуча організація: інститут напівпровідників АН України
м.Київ

Захист відбудеться " 21 " лютого 1994р. о 15-00 год.
на засіданні Спеціалізованої Ради К 068.14.17 в Київському політехнічному інституті за адресою 252056, м.Київ, пр.Перемоги,39,КПІ

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці КПІ.

Автореферат розісланий " 19 " січня 1994 р.


Відгуки на автореферат в одному екземплярі, завірені печаткою організації, пресимо надсилати за адресою інституту Вченому секретарю Спеціалізованої Ради.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00756529 (Y)

Вчений секретар
спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук, доцент

 - Ю.Д. КОБЦЕВ

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Різке погіршення екологічного стану навколишнього середовища потребує як безперервного його контролю, так і управління технологічними процесами виробництва, що впливають на його стан. В зв'язку з цим до первинних газочутливих перетворювачів, які виміряють параметри газового складу середовища, ставляться жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати якомога менші габарити і вагу, сумісними з сучасними ЕОМ і дозволяти кодування інформації при передачі її на великі відстані.

Цим вимогам майже не відповідають існуючі перетворювачі. Тому одним з перспективних наукових напрямків у розробці первинних вимірювальних перетворювачів, запропонованих у роботі, є використання залежності реактивних властивостей повного опору структур типу метал - діелектрик - напівпровідник від концентрації молекул оточуючого газу і створення на цій основі газочутливих частотних функціональних перетворювачів. Це дозволяє виготовляти газочутливі перетворювачі за мікроелектронною технологією, що дає можливість підвищити їх точність, швидкодію і надійність. Крім того, поєднання на одному кристалі первинного вимірювального перетворювача із схемами обробки інформації уможливить створення "інтелектуального" сенсору.

Використання частоти, як інформативного параметру, дозволяє уникнути застосування аналого-цифрових перетворювачів при обробці інформації, що знизить вартість систем діагностики і контролю.

Метою роботи є створення напівпровідникових газочутливих перетворювачів, технологічно сумісних з мікроелектронною елементною базою. Принцип роботи їх оснований на функціональній залежності повного входного опору біполярних та МДП-транзисторних структур з від'ємним опором від контрольованих параметрів газового середовища.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні задачі:

1. Розробка математичної моделі газочутливого перетворювача, складовими частинами якої є теоретичний розрахунок повного вхідного опору функційного перетворювача на основі біполярних та МДН-структур з від'ємним опором, отримання рівняння перетворення.

2. Дослідження фізичного механізму взаємодії молекул газу з активною металічною поверхнею електродів затвору МДН-структур.

3. Розробка і дослідження конструкцій пристроїв, призначених для реалізації функціонального перетворення "кількість хемосорбованих молекул газу-частота".

4. Експериментальне дослідження функцій перетворення розроблених газочутливих функціональних перетворювачів.

5. Створення експериментальної установки для визначення параметрів газочутливих функціональних перетворювачів і оцінка похибок практичних конструкцій.

Методи досліджень засновані на використанні основних положень теорії функції комплексної змінної, диференціального та інтегрального числення, лінійних електричних кіл, теорії ймовірності із застосуванням БОМ на стадіях аналізу та синтезу.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні наступних результатів:

1. Запропонована математична модель, яка описує залежність активної та реактивної складових повного вхідного опору функціональних перетворювачів на основі біполярних та МДН-транзисторних структур від концентрації хемосорбованих часток газу.

2. Розроблено принцип побудови функціональних перетворювачів на основі біполярних та МДН-транзисторних структур з від'ємним опором, відмінний від існуючих тим, що в ньому вперше застосовано взаємозв'язок реактивних властивостей біполярних та МДН-транзисторних

структур і концентрації хемосорбованих молекул газу.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені функціональні перетворювачі, чутливі до зміни параметрів газового середовища, сумісні з цифровими системами обробки інформації і виготовляються із застосуванням стандартної групової інтегральної технології. Це дозволяє значно знизити вартість систем діагностики і контролю, повністю реалізувати переваги мікроелектронних перетворювачів.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи були викладені і обговорені на всесоюзній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми приладобудування" /м.Новосибірськ, 1990р./, на XIX і XX обласних науково-технічних конференціях /м.Вінниця, 1990, 1991р./, на республіканській науково-технічній конференції "Проблеми автоматизації контролю електронних пристроїв" /м.Вінниця, 1990р./, II всесоюзній нараді молодих вчених і фахівців "Датчик -90" /м.Гурзуф, 1990/, всесоюзній науково-технічній конференції "Прилади з від'ємним опором та інтегральні перетворювачі на їх основі" /м.Баку, 1991р./, всесоюзній науково-технічній нараді "Порошкова металургія і композиційні матеріали і порошкові покриття", підсекція "Матеріали для електроніки" /м.Львів, 1991р./, I всесоюзній конференції "Актуальні проблеми отримання і використання сегнето-, п'єзо- і піролітичних матеріалів" /м.Москва, 1991р./, на науково-технічній конференції держав СНД "Контроль і керування в технічних системах" /м.Вінниця, 1992р./, на науково-технічній конференції держав СНД "Приладобудування - 92" /м.Керч, 1992р./, на науково-технічній конференції держав СНД "Проблеми автоматизації контролю електронних пристроїв" /м.Вінниця, 1992р./, науково-технічній конференції "Вимірювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва" /м.Хмельницький, 1992р./

Публікації. По матеріалах дисертаційної роботи опубліковано 14 друкованих праць, включаючи 2 позитивні рішення на авторські свідоцтва.

Об'єм і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 глав, висновків, переліку використаних джерел із 139 найменувань і 3 додатків. Загальний об'єм роботи складає 184 сторінки, а тому числі 149 сторінок основного тексту, малюнків - 63, таблиць - 9.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність дослідження і розробки напівпровідникових газоочутливих функціональних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором, сформульовані ціль, наукова новизна, практична цінність дисертації, приведена її структура.

В першій главі зроблено аналіз існуючих методів і засобів контролю параметрів газового середовища, показані їх переваги і недоліки. Розглянуті теоретичні принципи, використані для проектування напівпровідникових первинних вимірювальних газоочутливих перетворювачів і передумови використання напівпровідникових структур з від'ємним опором для цих цілей. Сформульовані задоки досліджень.

Аналіз існуючих методів і засобів контролю параметрів газового середовища показує, що їх метрологічні характеристики в значній мірі визначаються параметрами використаного первинного вимірювального перетворювача. Тому використання сучасних досягнень в області мікроелектронної технології дозволяє створювати первинні вимірювальні перетворювачі нової генерації. Для них характерні простота, надійність, широкий діапазон робочих температур. Групова технологія дозволяє отримати великі партії мікромініатурних приладів в єдиному технологічному процесі, що дає можливість їх повної ідентифікації. Найбільш повно цим вимогам відповідають вимірювальні перетворювачі на основі напівпровідникових структур, які реалізують сорбційний метод вимірювання концентрації газів. Тому в останній час почали використовуватися структури метал - напівпровідник, метал -

діелектрик - напівпровідник. В цих структурах чутливими до газу елементами є плівки металів платинової групи, які повинні бути пористими для кращого контакту з газовим середовищем. Плівки наносяться на поверхню напівпровідникового або діелектричного матеріалу структури.

Механізм дії МДН-структури оснований на змінюванні току стоку під дією каталітичної адсорбції досліджуваного газу на поверхні тонких металічних плівок затворного електроду. Дія газу змінює різницю роботи виходу електронів з металу і напівпровідника, що приводить до зміни порогової напруги структури і, отже, току стоку.

Огляд і аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням можливості використання газочутливих напівпровідникових структур, показав, що існуючі перетворювачі на основі МДН-структур мають невисоку чутливість, за принципом своєї роботи є аналоговими, що потребує кодування інформації при її передачі, або використання аналого-цифрових перетворювачів для її переробки, що значно здорожує контрольну-вимірвальну апаратуру.

В зв'язку з цим в даній роботі вперше запропоновано перспективний принцип побудови газочутливих частотних перетворювачів, тому що в цьому випадку реалізуються високі метрологічні показники пристроїв і можлива технологічна сумісність з мікроелектронними пристроями обробки інформації. Найбільшу функціональність і можливість поліпшення параметрів мають МДН-структури. На їх основі конструктивно і технологічно легко поєднати як сам первинний перетворювач, так і реалізувати від'ємний опір в даній схемі, що дозволяє створити принцип вимірювання "газ - частота".

Для практичної реалізації і промислового освоєння напівпровідникових газочутливих частотних вимірвальних перетворювачів необхідно провести комплексне дослідження, в яке входить розробка математичної моделі, експериментальна перевірка і апробація нових

технічних рішень.

В другій главі розглядаються фізичні процеси, які відбуваються у функціональному перетворювачі на основі діодної МОН-структури при її взаємодії із зовнішнім газовим середовищем, дається математичний опис цих процесів, освітлюється залежність основних параметрів функціонального перетворювача від живлячої напруги і електрофізичних параметрів напівпровідникової підкладки.

Газочутливий діодний елемент виконаний у вигляді кремнієвої підкладки з електронним типом провідності і питомим опором 4,5 Ом·см, на якій зроблений прошарок двоокису кремнію, товщиною 100нм. На прошарок двоокису кремнію наноситься прошарок алюмінію, а на нього осаджується прошарок паладію, товщиною 40нм. Площа взаємодії газочутливого елемента з газовим середовищем становить 1мм².

Для отримання основних співвідношень, які зв'язують ємність функціонального перетворювача з концентрацією молекул діючого газу, був розглянутий механізм взаємодії поверхні металевого електроду з газом. Цей механізм базується на адсорбційних явищах на поверхнях каталітично-активних металів платинової групи. Ці метали мають властивості так званих "перехідних", атоми яких містять незавершені всередині електронні оболонки / d - елементи/. Завдяки такій будові електронних оболонок дані метали являються каталізаторами, особливо під час проведення окислювально-відновлюваних реакцій. На поверхні цих металів знаходяться активні центри, причому адсорбція проходить з утворенням адсорбційних комплексів.

Згідно з теорією адсорбції Ленгмюра механізм дії газочутливої МОН-структури складається із кількох етапів. Перший етап - адсорбція фізична, коли на молекули реагента /газа/ впливають сильні діючі сили грітяжіння ван-дер-Ваальса і близькодійчі сили відштовхування Борна. Якщо молекула має достатню енергію, то фізична адсорбція переходить в хемосорбцію, тобто, має місце хімічна реакція між молекулами адсорбата і адсорбента. При хемосорбції практично

всі молекули дисоціюють, тому дисоціація є другим етапом, при якому молекули газу, такі як водень, вуглеводень, спирти, можуть віддавати електрони і ставати позитивно зарядженими іонами, а активні центри заряджаються негативно. Це означає, що металічна плівка накопичує негативний заряд. При підвищенні температури зменшується час адсорбції і збільшується швидкість дифузії дисоційованого водню крізь мікропори Pd-плівки. Таким чином, відбувається перехід до третього етапу взаємодії Pd-плівки з газом, тобто дифузії H^+ крізь пори Pd-плівки.

На межі розділу Pd/Al/SiO₂ створюється подвійний електричний прошарок, внаслідок чого напівпровідник p-типу кремнію на межі розділу SiO₂/Si має негативний заряд в приповерхневому прошарку, що спричиняє викривлення енергетичних зон напівпровідника, тобто змінюється ємність МДН-структури, яка залежить не тільки від величини і знаку прикладеної напруги, але й від перерозподілу заряду в приповерхневому прошарку кремнію, викликаного адсорбцією молекул газу.

Повна ємність діючого газочутливого елемента складається з послідовного з'єднання ємності діелектричної плівки і ємності, пов'язаної з об'ємним зарядом в приповерхневій області напівпровідникової підкладки, тобто кінцевий вираз має вигляд:

$$C_{\text{ФП}} = \frac{S \epsilon_2 \epsilon_n \left[1 - e^{-\frac{q U_s}{kT}} + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{q U_s}{kT}} - 1 \right) \right]}{\sqrt{2} L_d \epsilon_2 \theta + \epsilon_n d \left[1 - e^{-\frac{q U_s}{kT}} + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{q U_s}{kT}} - 1 \right) \right]}, \quad (11)$$

де ϵ_n, ϵ_2 - діелектричні сталі напівпровідника і діелектрика;

$$L_d = \sqrt{\frac{kT \epsilon_n}{n_0 q^2}} \quad - \text{дебаєвська довжина електронів};$$

$$U_s = \frac{q W^2 N_d}{2 \epsilon_n} \quad - \text{поверхневий потенціал};$$

n_0, p_0 - рівновагова концентрація електронів і дірок в напівпровідниковій підкладці;

N_d - концентрація донорних атомів в напівпровідниковій підкладці;

q - заряд електрона;

K - стала Больцмана;

$$\theta = \left[\left(e^{-\frac{qU_s}{kT}} + \frac{qU_s}{kT} - 1 \right) + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{qU_s}{kT}} - \frac{qU_s}{kT} - 1 \right) \right]^{1/2};$$

T - температура;

d, S - товщина і площа діелектричної плівки.

При дії газу на металевий електрод відбувається зміна повної ємності елемента за рахунок накопичення зарядів. Накопичені заряди в залежності від їх знаку і типу провідності напівпровідникової підкладки, згідно теорії Ленгмюра - Ландстрема, зсувають вольт-фарадні характеристики по відношенню до ідеальної по вісі напруг на величину.

$$\Delta U = \frac{\Delta U_{\max}}{1 + 1/\gamma K_M}, \quad /2/$$

де ΔU_{\max} - максимальна величина зсуву напруги при дії газу;

γ - коефіцієнт, який характеризує адсорбційні процеси;

K_M - концентрація молекул діючого газу.

При підстановці /2/ в /1/ отримуємо залежність ємності газочутливого елемента від величини накопиченого заряду визначеного газовим потоком, діючим на елемент. Підключення зовнішньої індуктивності до електродів газочутливого елемента дозволяє реалізувати діодний функціональний перетворювач, резонансна частота якого залежить від концентрації молекул вимірюваного газу. Рівняння перетворення в цьому випадку визначається:

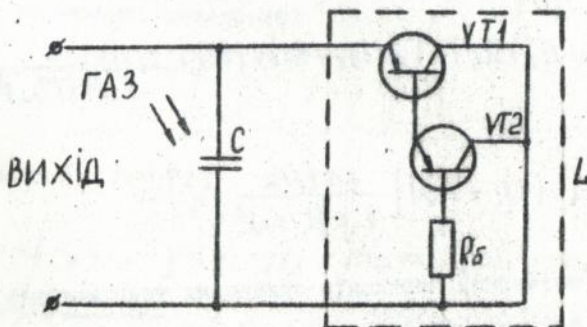
$$f_0 = \left[\frac{L S \epsilon_2 \epsilon_n \left(1 - e^{-\frac{q(U_s + \Delta U)}{kT}} + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{q(U_s + \Delta U)}{kT}} - 1 \right) \right)}{\sqrt{2} L_A \epsilon_n \theta + \epsilon_n d \left(1 - e^{-\frac{q(U_s + \Delta U)}{kT}} + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\frac{q(U_s + \Delta U)}{kT}} - 1 \right) \right)} \right]^{1/2}, \quad /3/$$

де L - зовнішня індуктивність.

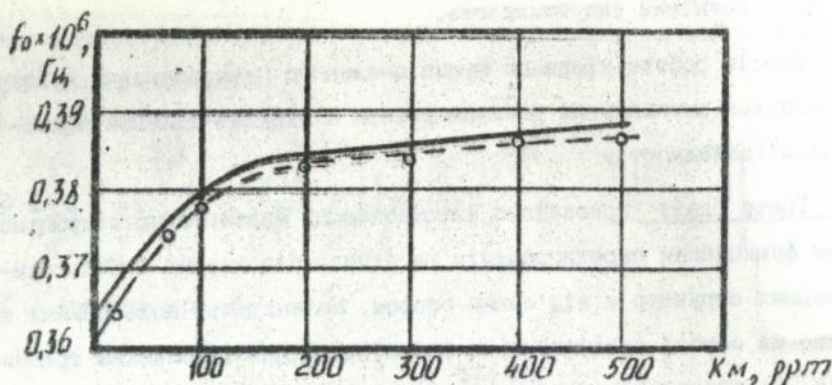
Аналіз роботи діодного функціонального перетворювача показує, що найбільш оптимальним режимом роботи є лінійна ділянка вольт-фарадної залежності.

Третя глава присвячена математичному моделюванню запропонованих функційних перетворювачів на основі біполярних і МОН-транзисторних структур з від'ємним опором. Математичне моделювання проведено на основі еквівалентних схем біполярних і польових транзисторів, що дозволило отримати аналітичні залежності основних параметрів функціональних перетворювачів.

Підвищення чутливості і точності діодних функціональних перетворювачів можливе на основі транзисторних структур, тому що вони дозволяють в одній схемі об'єднати як генератор електричних коливань, так і первинний вимірювальний перетворювач. В цьому разі в якості ємкості коливального контуру виступає діодний газоочутливий елемент, а індуктивність реалізується на основі двох біполярних транзисторів /мал.І/. Для виникнення коливань в такій структурі необхідно компенсувати втрати енергії в контурі.



Мал.І. Схема перетворювача змінного струму на основі двох біполярних транзисторів.



Мал.2. Теоретична / - / і експериментальна / - - / залежність резонансної частоти перетворювача на основі двох біполярних транзисторів від концентрації молекул водню.

Такі умови реалізуються при створенні від'ємного опору в транзисторній структурі. Для визначення рівняння перетворення необхідно розрахувати повний опір перетворювача. Такий опір має індуктивний характер, активна складова R в повній області частот - від'ємне значення, а величина індуктивності визначається реактивною X складовою:

$$R = (\gamma_{e1} + \gamma_{s1} + \gamma_{s2} + R_0) - (2(\gamma_{s2} + R_0) + (\gamma_{e1} + \gamma_{e2})) \frac{d_0}{1 + (f/f_d)^2}, \quad /4/$$

$$X = [2(\gamma_{s2} + R_0) + (\gamma_{e1} + \gamma_{e2})] \frac{d_0 f/f_d}{1 + (f/f_d)^2}, \quad /5/$$

де γ_{e1}, γ_{e2} - опір емітерних переходів складових транзисторів;

γ_{s1}, γ_{s2} - опір базових областей складових транзисторів;

R_0 - зовнішній базовий опір;

f - робоча частота;

f_d - гранична частота транзисторів в схемі із спільною базою

α_0 - значення коефіцієнта передачі току в схемі із спільною базою.

Рівняння перетворювача, яке описує зміну резонансної частоти при дії газу на вхід пристрою, отримуємо у вигляді:

$$f_0 = \left\{ \left[\frac{2\pi Q_0 \alpha_0 [2(\chi_{e2} + R_5) + \chi_{s1} + \chi_{e2}]}{f_a [1 + (f/f_a)^2] [U_0 + U_{max}/(1 + 1/\eta_{KM})]} \right]^{1/2} \right\}^{-1}, \quad /6/$$

де Q_0, U_0 - початкові заряд і напруга на металічному затворі газового елемента перетворювача.

Експериментальні та розрахункові залежності частоти функціонального перетворювача від зміни концентрації молекул надто приведені на мал.2.

Проте недоліком такої схеми є дуже вузький діапазон частот, в якому існує від'ємний опір, а також відносно мала його величина, що обмежує її можливості. Конструкція перетворювача на основі біполярної і МОН-транзисторної структур дозволяє отримати більш високі значення від'ємного опору в широкій області частот, причому МОН-транзистор виступає як первинний перетворювач, так і, як елемент схеми генератора /мал.3/.

Повний опір, який має емкісний характер, складається з активної і реактивної складових:

$$R_{\text{екв.}} = -X_2 \eta_2, \quad /7/$$

$$X_{\text{екв.}} = X_2 (1 - \eta_2) \quad /8/$$

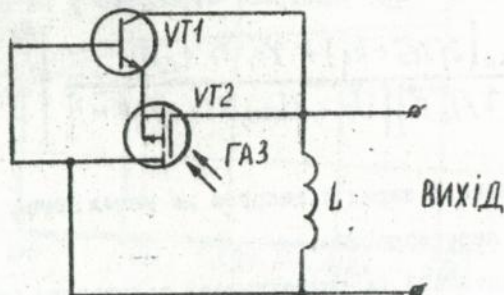
де $\alpha = \alpha_1 - jx_2$, $\gamma = \gamma_1 - j\gamma_2$, $m = m_1 - jm_2$, $\eta = \eta_1 - j\eta_2$,

$$\alpha = \frac{Z_5 Z_3 + Z_1}{Z_1 + Z_5 + Z_6}, \quad \gamma = \frac{Z_5 Z_3 - Z_2}{Z_1 + Z_5 + Z_6},$$

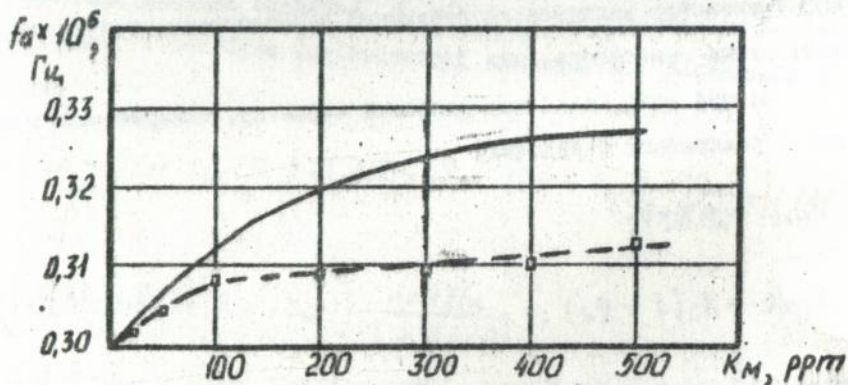
$$m = \frac{Z_4 \beta \alpha - Z_1 - Z_5 \alpha}{Z_1 + Z_4 + Z_5 - Z_4 \beta \gamma + Z_6 \gamma},$$

$$\eta = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_3 m + Z_1 \gamma Z_3 m - Z_1 \alpha - Z_1 \gamma m},$$

$$Z_5 = R_5 - jX_5, \quad Z_6 = R_6, \quad Z_3 = R_3 - jX_3, \quad Z_4 = R_4 - jX_4.$$



Мал.3. Схема перетворювача змінного струму на основі біполярного і польового з ізолюваним затвором транзисторами.



Мал.4. Теоретична / - / і експериментальна / - - / залежність резонансної частоти перетворювача на основі біполярного і польового з ізолюваним затвором транзисторів від концентрації водню.

$$Z_1 = R_1 - jX_1, \quad Z_2 = -jX_2, \quad \beta = \beta_1 - j\beta_2,$$

$$R_1 = \frac{R_{сб}}{1 + \omega^2 R_{сб}^2 C_{сб}^2}, \quad X_1 = \frac{\omega R_{сб} C_{сб}}{1 + \omega^2 R_{сб}^2 C_{сб}^2}, \quad X_2 = \frac{1}{\omega C_{зс}},$$

$$R_3 = \frac{R_{зб}}{1 + \omega^2 R_{зб}^2 C_{зб}^2}, \quad X_3 = \frac{R_{зб} \omega C_{зб}}{1 + \omega^2 R_{зб}^2 C_{зб}^2}, \quad R_4 = \frac{R_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2},$$

$$X_4 = \frac{R_k \omega C_k}{1 + \omega^2 R_k^2 C_k^2}, \quad R_5 = \frac{R_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2}, \quad X_5 = \frac{R_e \omega C_e}{1 + \omega^2 R_e^2 C_e^2},$$

$R_{сб}$ - опір стек-витік, $C_{сб}$ - ємність стек-витік, $C_{зс}$ - ємність затвор - стек, $R_{зб}$ - опір затвор-витік, $C_{зб}$ - ємність затвор-витік, S - крутизна польового транзистора, R_e, C_e - опір і ємність емітерного переходу, R_k, C_k - опір і ємність колекторного переходу біполярного транзистора, β - коефіцієнт передачі току в схемі зі спільним емітером.

Рівняння перетворення для цієї конструкції має вигляд:

$$f_0 = \left\{ 2\pi \left[\frac{L C_{сбв}}{1 + \frac{V_{max} / V_0}{1 + 1/\eta \sqrt{K_M}}} \right]^{1/2} \right\}^{-1}, \quad /8/$$

де $C_{сбв}$ визначається реактивною складовою /8/.

Експериментальні та розрахункові значення рівняння перетворення подані на мал.4.

Для збільшення чутливості і розширення температурного діапазону роботи функціонального перетворювача на основі біполярної та МОП-транзисторної структур необхідно замінити біполярний транзистор на польовий з ізолюваним затвором. В цьому разі отримуємо конструкцію перетворювача, складеного з двох польових

транзисторів, на затвори яких можуть одночасно діяти газова істоки, ще стверде передумови для збільшення чутливості перетворювача /мадБ/.

При розрахунках повного опору перетворювача, який має емкисний характер, вважатимемо однаковими параметри польових транзисторів. З врахуванням цього зауваження отримані співвідношення для активної і реактивної складових:

$$R_{зехв} = -X_g [G_2(V_1 N_1 - V_2 N_2) - G_2(1+Q_1) + Q_2(1-G_1) + \quad (10)$$

$$+ G_1(V_2 N_1 + V_1 N_2) + (V_2 F_1 + V_1 F_2)] ,$$

$$X_{зехв} = X_S [(1-G_1)(1+Q_1) + G_2 Q_2 + G_1(V_1 N_1 - V_2 N_2) - \quad (11)$$

$$- G_2(V_2 N_1 + V_1 N_2) + (V_1 F_1 - V_2 F_2)] ,$$

де $G = G_1 - jG_2$, $Q = Q_1 - jQ_2$, $V = V_1 - jV_2$, $F = F_1 - jF_2$, $N = N_1 - jN_2$.

$$G = \frac{Z_5 - (Z_4 Z_6 S_2 + Z_6)F + Z_5 Q + Z_5 V F}{Z_6 + Z_5 + Z_4 + Z_6 S_2 Z_4 + (Z_4 Z_6 S_2 + Z_6)N + Z_5 Q - Z_5 V N} ,$$

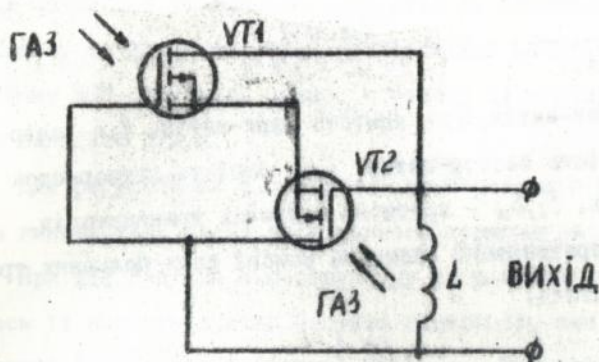
$$F = \frac{BQ(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1)}{A(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1) - (Z_1 + Z_0) - BV(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1)} ,$$

$$N = \frac{Z_6 - BQ(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1)}{A(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1) - (Z_1 + Z_0) - BV(Z_1 Z_3 S_1 + Z_1)} ,$$

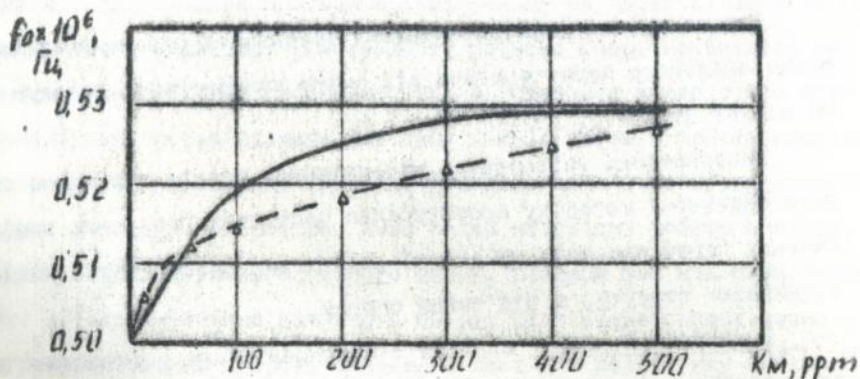
$$V = \frac{Z_2 A}{Z_2 B - Z_2 - Z_5} , \quad Q = \frac{Z_5}{Z_2 B - Z_2 - Z_5} , \quad B = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_1 Z_3 S_1} ,$$

$$A = \frac{Z_1}{Z_1 Z_3 S_1 + Z_1 + Z_2 + Z_3} , \quad Z_1 = R_1 - jX_1 , \quad Z_2 = -jX_2 , \quad Z_3 = R_3 - jX_3 ,$$

$$Z_4 = Z_1 , \quad Z_5 = Z_2 , \quad Z_6 = Z_3 , \quad S_1 = S_2 ,$$



Мал.5. Схема перетворювача змінного струму на основі двох польових з ізолюваним затвором транзисторів.



Мал.6. Теоретична / - / та експериментальна / - - / залежність резонансної частоти перетворювача на основі двох польових транзисторів з ізолюваним затвором від концентрації водню.

$$R_1 = \frac{R_{cб}}{1 + \omega^2 R_{cб}^2 C_{cб}^2}, \quad X_1 = \frac{R_{cб}^2 \omega C_{cб}}{1 + \omega^2 R_{cб}^2 C_{cб}^2}, \quad X_2 = \frac{1}{\omega C_{c1}},$$

$$R_3 = \frac{R_{зб}}{1 + \omega^2 R_{зб}^2 C_{зб}^2}, \quad X_3 = \frac{R_{зб}^2 \omega C_{зб}}{1 + \omega^2 R_{зб}^2 C_{зб}^2},$$

де $R_{cб}$ - опір стов-витік, $C_{cб}$ - ємність сток-витік, $R_{зб}$ - опір затвор-витік, $C_{зб}$ - ємність затвор-витік, $C_{зх}$ - ємність затвор-сток польових транзисторів, S_1, S_2 - крутизна польових транзисторів.

Рівняння перетворення схеми на основі двох польових транзисторів приймає вигляд:

$$f_0 = \left\{ 2\pi \left[\frac{L C_{2екв.}}{1 + \frac{V_{max}/V_0}{1 + 1/\mu_{KM}}} \right]^{1/2} \right\}^{-1}, \quad /12/$$

де $C_{2екв.}$ визначається реактивною складовою /12/ повного опору перетворювача.

Теоретичні та експериментальні залежності резонансної частоти функціонального перетворювача від зміни концентрації молекул водню подані на мал.6.

Використання розробленої математичної моделі дозволило створити інженерну методіку проектування частотних первинних вимірювальних перетворювачів на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором.

В четвертій главі описана експериментальна установка і умови проведення експерименту, оцінені похибки вимірювань, подані експериментальні дослідження основних параметрів запропонованих конструкцій газочутливих функціональних перетворювачів.

Експериментальна установка по дослідженню резонансної частоти від концентрації молекул газу, діючого на функціональний перетворювач, являє собою камеру, в якій знаходилась газочутлива МОН-структура, владнана в спеціальній підтримувач.

Так як хемосорбція молекул газу супроводжується розкладом адсорбованих молекул і утворенням продуктів їх взаємодії з поверхневими центрами, то для цього процесу необхідні певні енергетичні витрати, тому МОН-структура працює в режимі підігріву. Робоча температура складала 373 К.

Для регулювання і підтримки температури в необхідних межах були використані схеми електронного термометра і термостата.

При дії газу на МОН-структуру за рахунок хемосорбції змінювалась її ємкість і отже частота генерації, яка зв'язана з концентрацією молекул досліджуваного газу. Тривалість подачі газу становила 10 хвилин, пауза між подаванням імпульсів - 20 хвилин. Така тривалість паузи необхідна для відновлення чутливості поверхні. Концентрація молекул газу в імпульсах складала від 10 до 500 ppm.

Повний опір функціональних перетворювачів вимірювався фазовим методом. Він дозволяє проводити вимірювання на частотах 10 - 10 Гц, причому зміна характеру реактивності повного опору не впливає на точність вимірювання. Експериментальна установка являє собою комбінований вимірник різниці фаз типу ФК2-12 разом з приставкою, яка забезпечувала електричне живлення функціонального перетворювача. Напруга з виходу генератора, який задає необхідну робочу частоту, напруга з досліджуваного повного опору, різниця фаз між цими напругами, а також величина активного опору, підключеного послідовно з вимірюваним повним опором, складають дані для розрахунку активної і реактивної складової вхідного опору функціональних перетворювачів.

При оцінці похибки вимірювань повного опору перетворювачів припускається, що відомі середні або типові значення параметрів транзисторів функціональних перетворювачів і середні квадратичні відхилення. Для всіх параметрів транзисторів є справедливим закон нормального розподілу. Допускові значення похибки генератора електричних сигналів, електронного вольтметра і фазометру вважаються

заздалегідь відомими. Методичні часткові похибки входять в себе наступні складові: похибку вимірювання за рахунок внутрішнього опору генератора високочастотного струму; похибку, пов'язану з неточним устанавленням частоти; похибку, обумовлену встановленням електричного режиму перетворювача; похибку за рахунок кінцевої амплітуди високочастотного току перетворювача; похибку за рахунок використання методу непрямих вимірювань; похибки, обумовлені неточним прочитанням показань вольтметра і фазометра.

Розрахунок систематичних і часткових похибок показав, що сумарна похибка при вимірюванні повного опору функціональних перетворювачів складає $\pm 12\%$.

Оцінка похибок газочутливих функціональних перетворювачів при вимірюванні концентрації молекул газу показала, що найбільш суттєвими є похибки, обумовлені нестабільністю елементів частотно-залежної системи і впливом фазового зсуву в ланках замкнутого контура автогенератора. Врахування похибок, обумовлених дестабілізаційним впливом напруги живлення, температури і нелінійності, дозволило розрахувати повну похибку, яка складає $\pm 0,6\%$.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Проведено аналіз основних фізичних принципів, покладених в основу створення газочутливих напівпровідникових структур для контрольно-вимірювальної техніки. Показано, що найбільш перспективним напрямком є створення газочутливих перетворювачів на основі МОН-структур з від'ємним опором, що дозволяє реалізувати "інтелектуальні" перетворювачі по стандартній груповій технології шляхом конструктивного їх об'єднання з мікропроцесорними пристроями для попередньої обробки інформації.

2. Розроблені математичні моделі функціональних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором, досліджено

вплив контрольованих параметрів середовища на реактивну компоненту повного опору. Показано, що висока чутливість еквівалентної реактивності до концентрації молекул газу покладена в основу створення частотних газочутливих функціональних перетворювачів, сумісних з мікроелектронною технологією.

3. Виконані експериментальні дослідження підтвердили основні положення і результати, отримані при теоретичному аналізі, виявили їх збіг в межах $\pm 10\%$, дозволили визначити метрологічні характеристики запропонованих пристроїв: межа вимірювань 0-500 ppm, похибка вимірювань $\pm 4\%$, температура роботи-373 К - 423 К, робоча частота 10^3-10^7 Гц, потужність споживання - $3,2 \cdot 10^{-3}$ Вт.

4. Аналіз різних схем включення і режимів експлуатації дозволив розробити ряд газочутливих вимірювальних перетворювачів, з яких найбільш перспективним є конструкція на основі двох МОН-транзисторних структур за своєю технологічністю і більш високим ступенем точності вимірювання.

5. Проведений теоретичний аналіз, побудована фізична модель взаємодії газового середовища з металічною поверхнею перетворювача, на основі якої отримані рівняння перетворення, зв'язуючі концентрацію молекул досліджуваного газу з частотою генерації розроблених функціональних перетворювачів.

6. Розроблена експериментальна установка по визначенню концентрації молекул газу і параметрів функціональних перетворювачів на основі фазового методу в діапазоні 10^3-10^9 Гц з точністю визначення концентрації молекул газу $\pm 4\%$, а реактивних параметрів $\pm 12\%$.

7. Розроблені газочутливі функціональні перетворювачі знайшли застосування при експрес-аналізі газового середовища на ВО "Довтень" /м. Вінниця/.

Основний зміст дисертації відображено в наступних роботах:

1. Осадчук Е.В. Использование реактивных свойств однопереходного транзистора для создания газовых датчиков. Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы всесоюзной научно-технической конференции. -Новосибирск, 1990, -с.60.

2. Осадчук Е.В. Однопереходной транзистор с газочувствительной МДП-структурой, как датчик водорода. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Материалы II всесоюзного совещания молодых ученых и специалистов. Гурзуф, 1990, - с.122.

3. Осадчук Е.В. Полупроводниковые структуры с отрицательным сопротивлением в качестве газовых датчиков. Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе. Материалы всесоюзной научно-технической конференции, - Баку, 1991, с.91.

4. Якименко Ю.И., Селиванов С.А., Осадчук Е.В. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические материалы. Материалы всесоюзной научно-технической конференции. -Москва, 1991, с.-8-9.

5. Осадчук Е.В. Полупроводниковые газовые датчики на основе структур с отрицательным сопротивлением. Приборостроение -92. Материалы научно-технической конференции стран СНГ. -Керчь, 1992, с.57.

6. Осадчук Е.В. Полупроводниковое устройство для контроля газовой среды. Материалы научно-технической конференции стран СНГ "Контроль и управление в технических системах", -Винница, 1992, с.-122.

7. Осадчук Е.В. Полупроводниковый датчик контроля параметров газовой среды. Материалы научно-технической конференции стран СНГ с международным участием "Измерительная техника в технологических процессах и конверсии производства". -Хмельницкий, 1992, с.39

В. Скидан Ю.А., Осадчук Е.В. Микропроцессорная обработка сигналов полупроводниковых датчиков состава газовых сред. Материалы всесоюзной научно-технической конференции "ИИС-85", -Винница, 1985. -с.170-171.

9. Якименко Ю.И., Осадчук Е.В. Исследование возможности создания малогабаритных твердотельных датчиков для контроля параметров газовой среды в замкнутом объеме. Отчет по НИР. Деп. в УКРНИИТИ, 1990 -# гос.рег. 01890081268-30.11.90 - 47с.

10. Осадчук Е.В. Контроль газовой среды на основе полевых транзисторов. Материалы научно-технической конференции стран СНГ с международным участием "Приборостроение-93 и новые информационные технологии". - Николаев, 1993. -с.26.

11. Осадчук Е.В. Газочувствительные сенсоры на основе структур с отрицательным сопротивлением. Материалы 2-ой научно-технической конференции "Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах и конверсии производств". -Хмельницкий, 1993, -с.181-182.

12. Якименко Ю.И., Осадчук Е.В. Малогабаритные твердотельные датчики контроля параметров газовой среды. Рук. деп. в УКРНИИТИ, № 292-УК93, 26.02.93-42с.

13. Положительное решение по заявке № 4950354/25 /054709/ от 26.06.92, МКИ 5601N27/00. Газовый датчик /Осадчук Е.В., Осадчук В.С./ Заявлено 27.06.91.

14. Положительное решение по заявке № 4950355/25 /054710/ от 4.01.92, МКИ 5601N27/12. Устройство для измерения концентрации газа /Осадчук Е.В., Осадчук В.С./ Заявлено 27.06.91.

Печать односторонняя

Бумага типографская

Зак. № 1. Тир. 100 экз.

Подписано в печать 04.01.94г.

СКТБ "Модуль", Хмельницкое шоссе 97а

460 400

AB 29.353

AB 29.353