



**MATERIAŁY
VIII MIĘDZYNARODOWEJ
NAUKOWI-PRAKTYCZNEJ
KONFERENCJI**

NAUKA I INOWACJA – 2012

07-15 października 2012

**Volume 21
Techniczne nauki**

Przemysł
Nauka i studia
2012

Литература:

1. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А. А. Усольцев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

Д.т.н., проф. Осадчук О. В., Осадчук Я. О.

Вінницький національний технічний університет, Україна

МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ

Переваги мікроелектронних перетворювачів перед традиційними обумовлені, насамперед, застосуванням у них як чутливого елемента напівпровідникового матеріалу, групових методів його обробки і формування в ньому вимірювальних й інших схем підсилення й обробки сигналу методами мікроелектронної технології.

П'єзоелектричні властивості кремнію обумовили його широке розповсюдження при виробництві сенсорів тиску. Кремній володіє високою чутливістю провідності до змін механічного навантаження та доброю відтворюваністю характеристик. Перевагами сенсорів такого типу є: висока чутливість; добра лінійність; незначні гістерезисні явища; малий час спрацювання; компактна конструкція; економічна планарна технологія виготовлення.

Одним з простих тензосенсорів є тензорезистор, який представляє собою пластину або стержень напівпровідника з омичними контактами на кінцях. Один кінець пластини закріплюється на нерухомій основі, а на інший діє сила F . Для характеристики зміни опору при деформації користуються коефіцієнтом тензочутливості m , який являє собою відношення відносної зміни опору до відносної деформації у даному напрямку (l – розмір напівпровідника у напрямку деформації). Оскільки при стисненні $\Delta l < 0$, то знак зміни рухливості у цьому випадку співпадає зі знаком m . Коефіцієнт тензочутливості для германія та кремнію має найбільше значення порядку 150...175 [1].

Розглянемо напівпровідникові перетворювачі тиску. В останній час в якості сенсорів тиску використовують тензометри. Особливо перспективними є напівпровідникові тензометри дифузійного типу. Дифузійні тензометри на кремнієвій підкладці володіють високою чутливістю, малими розмірами та легко інтегруються з необхідними периферійними схемами [2–3].

За допомогою перетворювачів тиску контролюють як абсолютний, так і надлишковий тиск, вимірюють перепад та відношення тисків, отримують інформацію про деформації, вібрації та витрати у різних системах. Це найбільш поширений клас вимірювальних перетворювачів [4–6]. Виготовляють їх з

кремнієвої пластини, частину якої витравлюють до створення тонкої мембрани. Методом іонної імплантації на мембрані виконують резистивні елементи з між'єднаннями. При вимірюванні тиску мембрана прогинається, та під дією п'єзоелектричного ефекту відбувається зміна опору резистивних елементів. Товщина мембрани визначається областю допустимих тисків.

Спрощений зовнішній вигляд сенсора тиску показаний на рис.1. В основу роботи сенсора покладений тензорезистивний ефект у напівпровідниковому чутливому елементі. Чутливий елемент сенсора являє собою мембрану, сформовану в пластині з монокристалічного кремнію методом хімічного анізотропного травлення. На поверхні чутливого елемента, у місцях найбільших механічних напруг, методом введення бора в кремній n-типу провідності сформовані тензорезистори, що складають вимірювальну схему. Чутливі елементи характеризуються часовою стабільністю і відсутністю гістерезису. Конфігурація мембрани залежить від конфігурації вікна травлення і може відрізнитися від круглої форми. Як показано в [1], квадратна мембрана практично має такі ж деформаційні характеристики, що і кругла.

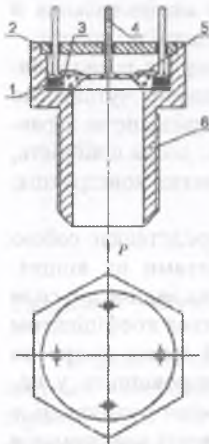


Рис.1. Конструкція мікросенсора тиску:

- 1 – перехідне кільце; 2 – кришка; 3 – проміжні провідники; 4 – вивідні проводи; 5 – напівпровідниковий чутливий елемент; 6 – корпус [7]

Топологія сенсора визначає електричні характеристики сенсора, габаритні розміри і форму мембрани, а також надійність роботи сенсора в цілому і є одним з важливих етапів його проектування.

Тензорезистори розміщені на краях мембрани і спрямовані уздовж кристалографічних напрямків $\langle 110 \rangle$ таким чином, що при деформації мембрани в двох з них виникають позитивні збільшення напруги ($+\Delta U_1$) внаслідок подовжнього тензоєфекту, а в двох інших – ($-\Delta U_2$) внаслідок поперечного тензоєфекту, причому $|\Delta U_1| = |\Delta U_2|$. Як показують вимірювання на макетних зразках, номінали тензорезисторів можуть мати розкид до 5%. Розкид по номіналах тензорезисторів приводить до початкового розбалансу моста, а також до погіршення температурних характеристик сенсора. Тому для балансування нуля моста застосовують два методи підгону номіналів тензорезисторів: включають у плечі моста додатковий опір на кристалі чи включають додатковий опір поза межами кристала (навісний елемент).

Перший метод допускає автоматизацію процесу підгону і, крім того, при правильному розрахунку електричних параметрів мікросенсора дозволяє

вирішити проблему термокомпенсації моста без ускладнення технології виготовлення. Це обставина при великосерійному виробництві істотно знижує собівартість сенсорів.

Важливим етапом проектування подібних сенсорів є вибір і розрахунок компонентів електричної схеми. Відомо, що в напівпровідникових тензорезисторів залежність питомого опору і коефіцієнта тензочувливості від температури сильніша, ніж в інших тензорезисторах (фольгових, дровових).

Відомо з [1], що з підвищенням рівня легування зменшується вплив температури на тензочувливість напівпровідника. Однак зі збільшенням концентрації легованих домішок зменшується як коефіцієнт тензочувливості π , так і номінал резистора. При кімнатній температурі $\pi=160$ для концентрації $N=10^{17}$ (см⁻³) і $\pi=75$ при $N=10^{20}$ (см⁻³).

Другим параметром, що залежить від температури, є опір тензорезистора. Як відомо з [1], залежність температурного коефіцієнта опору (ТКС) з підвищенням рівня легування від температури менш виражена і при $N=10^{20}$ см⁻³ ТКС кремнію дорівнює $0,96 \cdot 10^{-3}$, тобто кожному градусу зміни температури відповідає $0,96 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \% = 0,1 \%$ зміни опору плеча моста. Звідси випливає, що підвищення рівня легування ($N=10^{20}$ см⁻³) є одним з оптимальних шляхів одержання сенсора із широким температурним діапазоном.

У сенсорі для перетворення тиску в електричний сигнал, зображеному на рис. 2, мембрана сформована на кремнієвій підкладці, а конденсатор, який містить п'єзоелектричну тонку плівку, сформований на кремнієвій мембрані. Крім того, всі елементи: резистор, діод та транзистор також сформовані на головній поверхні кремнієвої підкладки. Вихідний сигнал з конденсатора оброблюється схемою, яка також розташована на Si підкладці [8].



Рис. 2. Сенсор тиску

Інтегральні перетворювачі тиску на основі тонких кремнієвих мембран з дифузійними тензорезисторами [9] застосовуються у медичній апаратурі для вимірювання артеріального тиску в тому числі внутрішньо порожнинним методом у датчиках загального призначення [10]. Технологія одержання тонких кремнієвих мембран сумісна з технологією інтегральних монолітних схем. Крім того, сумісність з технологією інтегральних схем (відкриває можливість дослідження різних компонентів інтегральних схем, у першу чергу

транзисторів, у якості тензочувливих елементів, розташованих на мембрані перетворювача тиску. Результати дослідження тензотранзисторів, при прикладенні до емітерного переходу зосередженого тиску, дозволяють підвищити чутливість таких приладів [10].

На рис. 3 схематично показаний перетворювач тиску з транзисторною структурою. Він являє собою тонку (10 мкм) кремнієву мембрану квадратної форми, обрамлену товстою (300 мкм) основою, що складає з мембранок єдиний монокристал кремнію. Площина мембрани збігається з кристалографічною площиною (001). Сторони мембрани орієнтовані по напрямках $\langle 110 \rangle$ і $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$. Розмір сторони мембрани 1500 мкм, сторони всього кристала перетворювача 3250 мкм.

Для дослідження залежності тензочувливих властивостей від положення транзистора на мембрані розроблена спеціальна топологія транзисторної матриці (рис. 4), що дозволила вирішити поставлену задачу при порівняно невеликій кількості транзисторів на мембрані. При розробці топології використана кристалографічна симетрія властивостей кремнію. Для дослідження тензотранзисторів на всій поверхні мембрани досить дослідити ці властивості в заштрихованій області DEF на рис. 4. Однак практичне розміщення навіть невеликого числа транзисторів у наведеній області викликає деякі труднощі під час проектування топології металевої розводки.

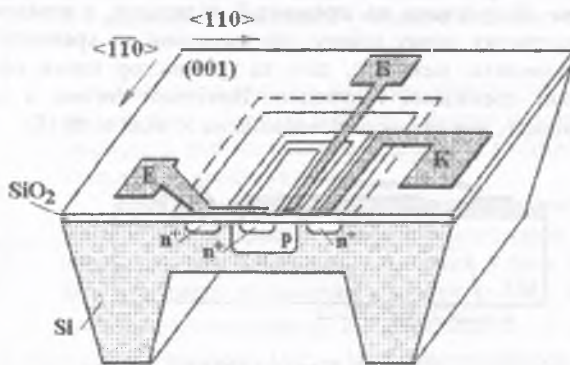


Рис. 3. Схематичний розріз мембранного перетворювача тиску з p-n-p транзистором [10]

На основі властивостей симетрії можна розмістити транзистори по всій мембрані таким чином, що будучи симетрично перенесеними в область DEF, вони утворять матрицю, що дозволяє судити про властивості тензотранзисторів у будь-якому місці зазначеної області, а отже, і всієї мембрани. Наприклад,

транзистори можуть бути розташовані так, як показано на рис. 4. При цьому уздовж кожного відрізка ламаної ABCDE можна при зазначених вище розмірах мембрани без утруднення розташувати по 5 транзисторів.

Таку схему розташування транзисторів на мембрані і було покладено в основу розробки топології дослідного зразка перетворювача. Для забезпечення можливості проведення термокомпресії зовнішніх виводів контактні площадки були розміщені на підкладці мембрани.

Для виготовлення дослідних зразків перетворювачів були використані пластини кремнію марки КЭФ 0,3/0,1 товщиною 300 мкм, орієнтовані в площині (100) і поліровані з двох сторін. Транзистор n-p-n типу виготовлені за стандартною технологією подвійної дифузії домішок (бора і фосфору).

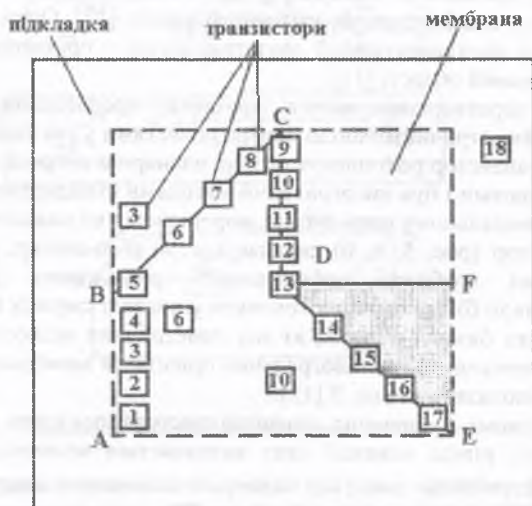


Рис. 4. Схема розташування тензотранзисторів на площині мембрани [10]

Після проведення повного технологічного циклу виготовлення транзисторів сформовані області мембрани методом локального анізотропного травлення в гарячому розчині КОН. Товщина сформованих мембран для різних зразків складала 8–25 мкм. Нерівномірність товщини мембрани кожного зразка не перевищувала 1 мкм. Нерівномірність товщини мембрани по пластині складала 5–10 мкм і визначалася непаралельністю вихідних пластин. Для вимірювання залежності електричних параметрів транзисторів (величини розподіленого тиску, що діє на мембрану, зразки встановлювалися в корпус, що

забезпечує подачу надлишкового тиску на різні сторони мембрани. Електричні виводи транзисторним структурам здійснювалися методом термокомпресії.

Як відомо, переважна більшість існуючих перетворювачів механічних величин в електричний сигнал має номінальну вихідну напругу порядку декількох десятків мілівольт [1, 9], в той час як рівень вхідних сигналів серійних пристроїв сполучення з інформаційно-керуючими обчислювальними системами складає одиниці вольтів. У зв'язку з цим пошук принципів створення первинних перетворювачів з підвищенням до декількох вольтів вихідним сигналом є ключовою ланкою у вирішенні проблеми спрощення і підвищення надійності роботи відповідних систем контролю і вимірювання [11].

Успішне розв'язання зазначеної задачі може бути досягнуте на основі сенсорів нового типу, принцип дії яких базується на специфічних особливостях біполярного переносу в анізотропних напівпровідниках [12]. Один із таких приладів – біполярний двохколекторний тензотранзистор з прискорюючим електричним полем у базовій області [11].

Розглянутий перетворювач містить кремнієву профільовану мембрану з двома твердими і симетричними щодо центра областями у вигляді прямокутних острівців. Тензотранзистор розташовувався на планарній стороні мембрани між зазначеними острівцями і був виготовлений методами стандартної інтегральної технології на епітаксialьному шарі n-типа, вирощеному на пластині p-Si.

Тензотранзистор (рис. 5, а, б) складається: а) р⁻-емітер, розташований усередині базової n-області, сформованої розділовою дифузією на епітаксialьному шарі; б) два омичних контакти у вигляді смужок n⁻-n-типу, розташованих на краях базової області; в) два симетричних відносно емітера колекторного р⁻-n-переходу. Кристалграфічна орієнтація мембрани й елементів тензотранзистора показана на рис. 5 [11].

Електрична схема включення тензотранзистора показана на рис. 5, а. Нерівноважні носії, рівень інжекції яких визначається величиною опору R_E , дрейфують в електричному полі, що задається величиною напруги живлення V_0 , прикладеної до омичних контактів бази. Під час відсутності механічної деформації колекторні струми, обумовлені поперечним дифузійним розтіканням нерівноважних носіїв, рівні між собою, і вихідний сигнал, що знімається з навантажувальних опорів R_{K1} і R_{K2} , близький до нуля (за умови, що $R_{K1} = R_{K2}$).

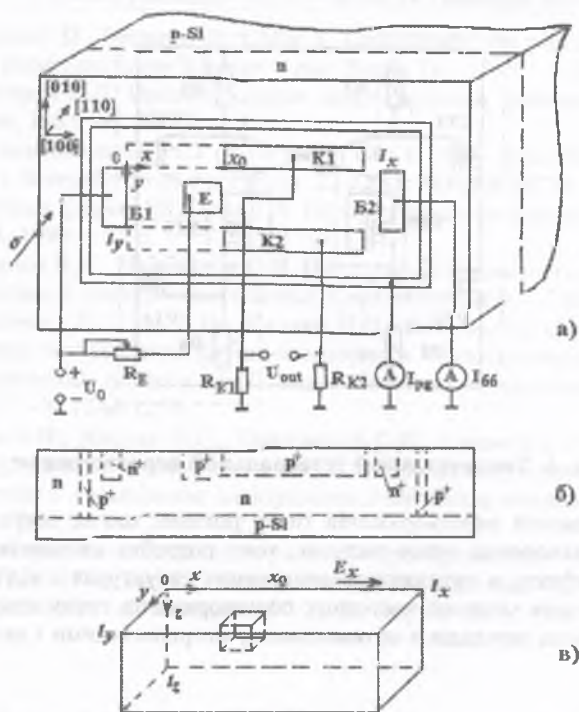


Рис. 5. Топологія і схема включення тензотранзистора [34]

Для підвищення чутливості в роботі [13] запропонований тензочутливий інтегральний перетворювач. Тензоперетворювач містить пружний елемент і мостову тензосхему. Мостова тензосхема складається з двох пар основних комплементарних МДН-тензотранзисторів, з'єднаних між собою в парах стоковими виводами, та два додаткових МДН-тензотранзистора. Між витоками і затворами кожного тензотранзистора включені тензорезистори, затвор і стік кожного із додаткових МДН-транзисторів з'єднані між собою (рис. 6).

Під дією деформації малі зміни струму МДН-тензотранзисторів мосту викликають великі зміни напруги на його виході із-за великого вихідного опору. Крім того, під дією деформації відбувається зміна опору тензорезисторів між затвором і витком МДН-транзисторів, а також зміна струмів тензотранзисторів, що приводить до зміни потенціалів на затворах тензотранзисторів мосту.

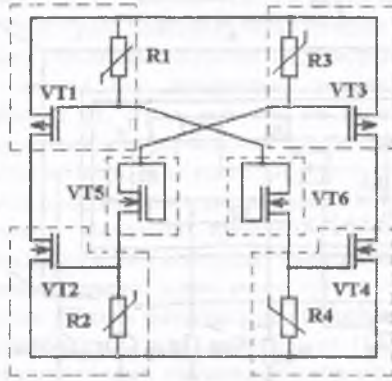


Рис. 6. Тензочутливий інтегральний перетворювач

Аналіз сучасних перетворювачів тиску показав, що не існує приладів з принципом перетворення «тиск-частота», тому розробка елементів теорії тензореактивного ефекту в чутливих транзисторних структурах з від'ємним опором і математичних моделей частотних перетворювачів тиску створює умови для розробки таких приладів з оптимальними метрологічними і економічними показниками.

Література:

1. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. –М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Микроэлектронный механоэлектрический датчик: А.с. 1385951 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84 / Ваганов В.И., Случак И.И. (СССР). -№3995169/24-25; Заявлено 05.11.85; Опубл. 1988. – 3 с.
3. Преобразователь механического воздействия в электрический сигнал: А.с. 1387812 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84 / Бритвин С.О., Ваганов В.И., Эрглис И.К. -№3974251/31-25; Заявлено 05.11.85; Опубл. 1988. – 6 с.
4. Пат. №11226 С1 України, МКИ G 01 L 21/12. Датчик тиску / С.С. Варшава, В.О. Воронін, А.С. Островська, К.С. Щербай. -№94321814; Заявлено 15.10.90; Опубл. 25.12.96. Бюл. №4. –3 с.
5. Патент №5405786 США, МКИ H01 L021/04. Stress sensitive p-n junction devices formed from porous silicon and methods for producing the same: Патент №5405786 США, МКИ H01 L021/04 / Kurtz, Anthony D. (США). -№ 237011; Заявлено 29.04.94; Опубл. 11.04.95. – 6 с.

6. Schubert D., Schwabe F., Uhlig T. Drucksensor mit piezoresistiven Widerstanden aus polykristallinem Silizium // *msr*, Berlin 31. –1988. – P.341-344.

7. Егизарян Э.Л. Проектирование микродатчиков давления // *Микроэлектроника*. №6, 1981. –С. 20-22.

8. Датчик давления: PCT (WO). МКИ G01 L 9/08 / Seiko Epson Corporation, JP (Япония). Заявлено 06.08.91; Оpubл. 20.02.92. №5 (PЖ ИСМ 82-09-93).

9. Датчики фирмы MOTOROLA. Обзор продукции фирмы MOTOROLA. – М.: ОДЭКА, 1998. – 75 с.

10. Ваганов В.И., Поливанов П.П. Интегральный транзисторный преобразователь давления // *Электронная техника*. Серия 11. Вып.4. – С.89-92.

11. Бабичев Г.Г., Гузь В.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе // *Физика и техника полупроводников*. –1992. –Т.26. Вып.7. – С.1244-1250.

12. Гузь В.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Перераспределение электрического потенциала в искусственно анизотропной полупроводниковой пластине с кольцевыми электродами // *Физика и техника полупроводников*. –1990. –Т.24, №3. –С.409-412.

13. Тензочувствительный интегральный преобразователь: А.с. 1393265 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84. / Беклемишев В.В., Бритвин С.О., Ваганов В.И. (СССР). №4030218/31-25; Заявлено 07.01.86; Оpubл. 1988. – 3 с.

Титов Д.Е., Угаров Г.Г., Кузнецов П.А., Сошинов А.Г.
Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ

СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ В ТРЕБОВАНИЯХ К СИСТЕМАМ МОНИТОРИНГА НА ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ И ЭЛЕКТРОТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

Механизм образования гололедных отложений на проводах воздушных линий (ВЛ) подробно изучен. Интерес к исследованиям в данном направлении обусловлен необходимостью борьбы с гололедно-ветровыми нагрузками на ВЛ. Согласно исследований, проведенных в России и за рубежом, более 50% аварий на ВЛ происходит в результате гололедно-ветровых воздействий. Предотвращение гололедно-ветровых аварий на ВЛ прежде всего зависит от получения своевременной информации о динамике изменения состояния элементов ВЛ. Получение такой информации достигается применением различных по принципу действия информационно-измерительных систем мониторинга ВЛ, которых на данный момент разработано большое количество. Разработанные системы нашли широкое применение в эксплуатации ВЛ.