

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МИХАЙЛЕНКО Ігор Всеволодович

УДК 621.382

ДИСЕРТАЦІЯ

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕХАНІЧНИХ
ВЕЛИЧИН З ВИКОРИСТАННЯМ ПОПЕРЕЧНИХ ТЕНЗОЕФЕКТІВ

Спеціальність 05.27.01 – твердотільна електроніка

Технічні науки (17 Електроніка та телекомунікації)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Михайленко І.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Орлов Анатолій Тимофійович,
канд. техн. наук, доцент

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Михайленко І.В. Напівпровідникові перетворювачі механічних величин з використанням поперечних тензоефектів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – «Твердотільна електроніка» (17 Електроніка та телекомунікації). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробленню фізико-технологічних засад створення та дослідженню перетворювачів механічних величин на основі поперечних ефектів в анізотропних напівпровідниках.

Розроблені фізичні основи побудови перетворювачів механічних величин з використанням поперечних ефектів і проведено їх дослідження на експериментальних зразках. Продемонстрована перспективність використання перетворювачів на основі ефекту тензоэдс як в дискретному, так і в інтегральному виконанні для створення датчиків сили і тиску, які працюють в діапазоні температур 233-373 К. Виявлений ряд концентраційних ефектів у германії і запропоновані перетворювачі оригінальних конструкцій, таких як диференціальний тензотранзистор, безконтактний лінійний датчик переміщень на основі магнітоконцентраційного ефекту, порогові датчики кута повороту і сили на основі осцилаторного ефекту з можливістю управління порогом переключання. Дослідження, що проведені, підтверджують перспективність практичного використання поперечних ефектів у багатодолинних напівпровідниках для створення перетворювачів механічних величин.

Такі ефекти характеризуються наявністю поперечних градієнтів концентрації носіїв заряду або компонент електричного поля від прикладеної ззовні напруги. Використання поперечних ефектів дозволяє знизити або уникнути складових похибки, що властива тензорезистивним перетворювачам, і реалізувати простішу, компактну і економічну альтернативу останнім. Як результат цього дослідження був запропонований перетворювач у вигляді 4-х контактного елемента електронного ланцюга - аналог резисторного моста, що був вбудований засобами інтегральної технології в кремнієву мембрану і став її невід'ємною частиною. Основною відмінністю нових приладів від інших є точність реєстрації тиску в широкому діапазоні температур, оскільки первинний перетворювач є локалізованим, в якому значно зменшені просторові градієнти. Проте, визначення кожного окремого фізичного впливу потребує розробки окремої специфічної конструкції приладу та формування чутливого елемента, тому пошук і дослідження фізичних принципів і технологій та розроблення на їх основі універсальних чутливих та надійних перетворювачів є актуальною проблемою, яка вирішується у даній роботі.

В роботі вирішується важливе науково-технічне завдання з розроблення фізичних основ побудови перетворювачів механічних величин з використанням поперечних тензоефектів. Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі основні завдання, вирішення яких представляється до захисту:

- дослідження і систематизація ефектів, які супроводжують анізотропію провідності, індуковану деформацією кристалів Ge і Si;
- розробка топології, конструкції і технології виготовлення МЕМС інтегрального перетворювача тиску (ІПТ) на основі ефекту тензо-е.р.с.;
- дослідження електрофізичних властивостей перетворювача сили на основі ефекту тензо-е.р.с., виявлення чинників, що визначають метрологічні властивості характеристик;

- дослідження механічних перетворювачів, заснованих на концентраційних ефектах в напівпровідникових кристалах Ge та Si;
- розробка вторинних манометричних перетворювачів. Оптимізація конструктивних і схемних рішень для побудови дистанційних вимірювальних приладів на основі тензо-е.р.с.-перетворювачів.

Об'єктом досліджень є характеристики поперечних ефектів викликаних наведеною анізотропією в Si та Ge. Практичним результатом досліджень є розробка як MEMC інтегрального перетворювача тиску, так і промислового приладу для вимірювання тиску рідких середовищ.

Для вирішення поставлених завдань використовувалися феноменологічне узагальнення поперечних ефектів, аналітичний розрахунок провідності в напівпровідниках кубічної сінгонії, експериментальне дослідження характеристик перетворювачів з метою виявлення джерел системних похибок перетворення і технологічна оптимізація конфігурації і процесів виготовлення MEMC, спрямована на мінімізацію останніх, режими хімічного травління Ge та Si, методи створення контактів (термокомпресія) і складення датчиків, комп'ютерні методи розроблення шаблонів для виготовлення меза-структур, методи кремнієвої технології: дифузія, епітаксія, щавлення, відпалення та ін., модуляційно-поляризаційна діагностика термонапружень.

В результаті виконаного дослідження отримані наступні нові наукові результати.

1. Вперше досліджено характеристики нелінійності ефекту тензо-е.р.с. у кристалах кремнію і германію у широкому діапазоні концентрацій (від $4 \cdot 10^{19}$ до $4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$), для різних кристалографічних орієнтацій, що дозволило удосконалити лінійну модель ефекту тензо-е.р.с. введенням апроксимуючого полінома.
2. Запропоновані та досліджені оригінальні принципи побудови дискретних перетворювачів сили зі зниженими гістерезисом і аддитивною складовою

похибки перетворення, які знайшли застосування у промислових вимірювальних приладах.

3. Запропоновано та досліджено інтегровані структури перетворювача тиску у МЕМС виконанні, які мають підвищені стабільність і точність характеристик перетворення в широкому діапазоні температур.

4. Виявлено і досліджено низку поперечних концентраційних ефектів у германії і запропоновано нові типи перетворювачів, таких як диференційний тензотранзистор, безконтактний лінійний датчик переміщень, порогові датчики кута повороту і сили на основі осцилісторного ефекту.

Нові наукові результати, отримані в роботі мають наступне практичне значення. За результатами досліджень розроблені такі прилади:

1. На основі тензо-е.р.с. перетворювачів (ТЕП) тиску розроблений та виготовлений МЕМС сенсор із зниженою, в порівнянні з існуючими перетворювачами загальнопромислового застосування, похибкою перетворення у промисловому діапазоні температур.

2. На основі дискретних ТЕП розроблені дистанційні прилади для вимірювання тиску ПДМ-2 і комбінації тиску та температури ПДМТ-1. Використання в цих приладах оригінальних технічних рішень, у тому числі, за авторським свідоцтвом на "Пристрій для виміру сил", забезпечили досягнення класу точності 1%...1,5% в діапазоні температур 0°C...80°C. Прилад ПДМ-2 пройшов Державні випробування і був рекомендований до серійного випуску.

Дисертаційна робота є узагальненням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, проведених автором самостійно. Головну ідею роботи та напрям досліджень було запропоновано д.ф.-м.н. Романовим В.О. з ІФН ім В.Є.Лашкарьова НАН України що, згодом, було доповнено науковим керівником, а їх практичне втілення належить здобувачеві. Роль автора дисертаційної роботи полягає в узагальненні і прикладному аналізі наукової літератури з метою виявлення найбільш важливих ефектів і характеристик

матеріалів для практичного застосування. У спільних роботах авторів повністю належить отримання експериментальних результатів та їх обробка, участь у постановці завдань, інтерпретації і узагальненні отриманих результатів. Внесок автора в проведення досліджень і отримання результатів, приведених в дисертації, є визначальним. Особисто здобувачем виконані: топологічна оптимізація меза-структури МЕМС, запропоновані конструкція і технологічний процес виготовлення шаблонів для технології виробництва МЕМС ІПТ, а також розробка і розрахунок схем вторинних перетворювачів. Автор роботи особисто представляв результати досліджень на науково-технічних конференціях і семінарах.

Основні положення і результати досліджень докладалися та обговорювалися на: сьомому Всесоюзному семінарі з оптичних і електрооптичних методів та засобів передачі, переробки, перетворення і зберігання інформації (м. Москва, 1981 р.), конференції "Напівпровідникові магніточутливі прилади" (м. Абовян, 1985), IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and nanotechnology" (ELNANO – 2017, м. Київ, 2017).

За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (1 з яких у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз даних), та отримане авторське свідоцтво на пристрій для виміру сил.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатка. Вона містить 128 сторінок, 42 рисунки, та 2 таблиці. Список використаної літератури має 148 найменувань на 15 сторінках. Додаток викладений на 4-ох сторінках та містить матеріали, що не увійшли до основної частини дисертації.

У першому розділі проведено аналітичний розгляд явищ, що призводять до поперечних ефектів. Розгляд ведеться в термінах анізотропії провідності, яка трактується як неколінеарність векторів електричного поля і струму, незалежно від фізичної природи останньої. Це дозволяє використати схожий формальний апарат при аналізі різних ефектів. Зокрема, аналізуються випадки анізотропії, наведеної деформацією і магнітним полем. Визначений параметр анізотропії (ПА) і зазначені абсолютні та локальні максимуми орієнтаційної функції ПА при одновісній пружній деформації зразка та їх відповідні комбінації направляючих косинусів для напівпровідників кубічної сингонії. Розглянуті випадки сильного та слабого полів і описаний ефект тензо-е.р.с. в лінійному наближенні.

Другий розділ присвячений дослідженню дискретних перетворювачів тиску, що використовують тензо-е.р.с. (ТЕП). Запропонована конструкція, яка забезпечує одновісне стискування ТЕП і відсутність тертя в облаштуванні кріплення та пов'язаного з цим механічного гістерезису. Надлінійна характеристика ТЕП інтерпольована поліномом $E_y = AP_x^2 + BP_x$. Експериментально досліджені характеристики нелінійності різних матеріалів (*n*-Si, *p*-Si, *n*-Ge) різних орієнтацій ({110}, {100}), і вибраний оптимальний по нелінійності матеріал для дискретних ТЕП - *n*-Si {110}, з питомим опором в межах 1...100 Ом*см. Підтверджено, що у тензо-е.р.с.-перетворювачів, які є функціональними аналогами тензорезисторного моста, виключаються проблеми узгодження температурних залежностей чутливості та імпедансів окремих тензорезисторів. Як наслідок цього, вони мають низьке значення аддитивної складової похибки (баланс нуля), яка в діапазоні 253...373 К не перевищує 0,2% від номінального сигналу, що на 30...40 дБ краще відповідного параметру у тензорезисторних мостах. Динамічний діапазон вільного ТЭП - близько 120 дБ.

Третій розділ містить результати створення і дослідження перетворювачів, що використовують концентраційні ефекти в германії у поєднанні з іншими фізичними ефектами. Пропоновано та досліджено ряд оригінальних приладів на

розмірних ефектах в випадку сильного поля: диференціального тензотранзистора з вихідним сигналом до 5 Вольт, перетворювач переміщення на основі магнітоконцентраційного ефекта, порогові перетворювачі кута повороту і сили, керовані магнітним полем, що ґрунтуються на взаємодії осцилляторного та магнітоконцентраційного ефектів.

Четвертий розділ присвячений дослідженню інтегрального тензоперетворювача тиску (ІТПТ) за МЕМС-технологією. Тут вирішені питання вибору фізичного принципу роботи чутливого елементу, оптимізації топології пружного елементу (ПЕ) і конструкції перетворювача в цілому, вибір оптимальних технологічних прийомів виготовлення перетворювача з метою мінімізації адитивної складової погрішності вихідного сигналу в широкому діапазоні температур. Вибір ТЕП в якості чутливого елементу визначається такими його перевагами як: низький температурний дрейф нульового сигналу порівняно з тензорезисторним мостом; вчетверо зменшена кількість джерел шуму (контактів); нечутливість до ізотропної поверхневої деформації; локальність ТЕП як функціонального перетворювача. Як оптимальний спосіб для мікропрофілізації кремнію для ПЕ вибрано метод лужного анізотропного травлення. Цей метод має свої особливості, зокрема розтравлення зовнішніх кутів, для чого було проведено розрахунки компенсаційних шаблонів. Випробування виготовленої партії МЕМС ІПТ показали, що адитивна складова похибки і її зміна в діапазоні 233-373 К дорівнюють, відповідно 1% і 1%...2% від номінального сигналу, що, принаймні, по порядку менше, ніж відповідні параметри для тензорезистивного моста.

В п'ятому розділі описана конструкція і результати випробувань приладів, розроблених за результатами дослідження ТЕП. Такими приладами, впровадженими в промислове використання, є перетворювачі дистанційні манометричні ПДМ-2 і ПДМТ-1. У приладах використаний блок термокомпенсації чутливості, на який отримано авторське свідоцтво.

Комплексний прилад ПДМТ-1 має токовий вихід; при цьому полярність струму живлення перемикає режими виміру тиск/температура з відповідним перемиканням полярності вихідного сигналу. Окрім цих приладів на основі ТЕП, були виготовлені та досліджені експериментальні зразки електронних вагів.

Ключові слова: кремній, германій, анізотропія, провідність, первинний перетворювач, тензо-е.р.с., тензоефект, МЕМС, механічні віличини.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Полупроводниковые дистанционные манометры. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А. и др. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Республиканский межведомственный сборник. -Киев: Наукова думка. -1981, вып. 34, —С. 71-75. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
2. Полупроводниковый преобразователь давления и температуры. Романов В.А., Михайленко И.В., Святогор Л.В., Кондрашкин В.Ф. // Приборы и системы управления, 1983, №10. -С. 22-23. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
3. Анизотропия осцилляторного эффекта в многодолинных полупроводниках кубической симметрии. Бойко И.И., Буянов А.В., Михайленко И.В. и др. // Украинский физический журнал. -1984, Т. 29, №8, -С.1230-1236. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
4. Буянов А.В., Михайленко И.В. Преобразователь перемещения на основе магнитоконцентрационного эффекта // Приборы и системы управления. — 1985, №3. - С. 27-28. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.

5. Дифференциальный тензотранзистор. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А., Сердега Б.К. // Приборы и системы управления. -1987, №5. — С. 26. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
6. Михайленко И.В., Орлов А.Т., Сердега Б.К. Интегральный преобразователь давления на основе эффекта поперечной тензоэдс. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 29 (68), №3. 2018. С. 181-188. Особистий внесок дисертанта: участь у постановці задачі, виконанні досліджень, інтерпретації результатів та написання статті.
7. Михайленко И.В., Орлов А.Т., Сердега Б.К. Модуляционно-поляризационная диагностика термонапряжений в интегральном преобразователе давления. // Физика и техника полупроводников, 2017, том 51, вып. 4. —С. 524-528 (іноземне видання). Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
8. Авт. свид. №907406. Устройство для измерения сил. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А. - Оpubл. 23.02.82, Бюллетень ОИПОТЗ №7. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень.
9. Управляемый магнитным полем сигнализатор давления. Буянов А.В., Жадько И.П., Михайленко И.В. и др. // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, АрмССР, 1985. — С. 31-32. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
- 10.Буянов А.В., Михайленко И.В. Магнитоконцентрационный датчик положения // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, АрмССР. —1985. -С. 22-24.

Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.

11. Полупроводниковый дистанционный манометр ПДМ-2. Романов В.А., Жадько И.П., Михайленко И.В. и др. // Тезисы седьмого Всесоюзного семинара по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации, Москва, 1981. -98с.

Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.

12. Mikhailenko I.V., Orlov A.T., Serdega B.K. Diagnostics of Thermal Stress in MEMS Pressure Transducer Based on Tenso-e.m.f. Effect // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology — P. 201-204.

Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.

ABSTRACT

Mikhailenko I.V. Semiconductor transducers of mechanical parameters, based on transversal tenso-effects. – A qualifying scientific research, a manuscript.

This Ph.D. dissertation is compiled as per specialty 05.27.01 – Solid-state electronics (17 Electronics and Telecommunications). The research has been carried out and the public defense thereof will take place at National Technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute", in the city of Kyiv, 2019.

The dissertation is dedicated to the development of physical concepts and technological principles of design and research of transducers of mechanical parameters based on transversal effects in anisotropic semiconductors.

Such effects are characterized by the presence of transverse charge carriers' gradients and/or electric field components induced by an external factor, e.g. tension. Transversal effects' utilization brings down conversion error components inherent in piezoresistive transducers and allows for a simpler, more compact, and economical alternative. As a result of this research, a four-contact point transducer that is electrically equivalent to a Wheatstone bridge embedded into a silicon membrane has been introduced. The distinctive feature of the new devices is an increased precision of their pressure conversion within a wide temperature range, since the transducer is effectively localized, which significantly reduces spacial gradients.

Physical concepts of mechanical parameters transducers' design based on transversal effects have been developed and experimental specimens researched. Potential benefits of transducers based on tenso-e.m.f.-effect, both in discrete and MEMS-construction, for force and pressure sensors in 233-373K temperature range, have been confirmed. A number of concentration-based effects in Ge were introduced and original transducers, such as differential tenso-transistor, linear displacement proximity sensor based on magneto-concentration effect, threshold sensors of rotation angle and force, based on oscillistor effect with threshold control option have been developed. The completed research confirms the high potential of transversal effects in multi-valley semiconductors for practical application development of mechanical parameters sensors.

The research is aimed at the development of physical concepts of mechanical parameters transducers based on transversal effects. The following tasks have been identified as the means of achieving the said objective. Those are presented for consideration as follows.

- Research and classify the effects that follow conductance anisotropy produced by deformation of Ge and Si crystalline
- Develop optimal configuration, topology and technology of MEMS pressure transducer based on tenso-e.m.f. effect

- Study electrical and physical properties of the tenso-e.m.f. effect-based force transducer and identify the factors that determine the transducer metrology
- Study mechanical transducers based on concentration effects in Ge and Si crystalline
- Develop secondary manometry transducers and optimize circuitry design for remote measurement devices, based on tenso-e.m.f. transducers

The following methods and techniques have been used in this study: generalized characterization of the transversal effects, analytical conductivity calculation of cubic lattice syngony semiconductors, applied research of transducer parameters targeted at systemic error discovery, topologic and technology optimization of MEMS-transducers for minimization of the measurement inaccuracies, chemical Si and Ge etching, contact pads methods, sensor assembly, computation of mask configuration for mesa-structures microfabrication, silicon technology methods: diffusion, epitaxy, etching, etc., modulation on polarization spectroscopy for thermal stress detection.

Scientific novelty of the obtained results are below.

- Non-linearity parameters of the tenso-e.m.f. effect have been researched for the first time within a wide concentration range ($4 \cdot 10^{19} \dots 4 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$) for various crystalline directions, which allowed to modify the linear theoretical model by adding an approximating polynome.
- Original formation principles of discrete force transducers have been introduced and studied. They feature both reduced hysteresis and additive conversion errors, which facilitated devices for industrial measurement development.
- An original MEMS transducer structure has been proposed and researched. It displayed improved stability and conversion accuracy within a wide temperature range.
- A number of transversal concentration effects in Ge have been discovered and studied. Original transducer designs, such as differential tenso-transistor, linear

proximity displacement transducer, oscillistor effect-based threshold detectors of rotation angle and force have been introduced.

Practical application of the research results. The following devices have been designed based on this research:

- A MEMS tenso-e.m.f.-based pressure sensor has been developed and prototyped. The sensor demonstrated reduced measurement error within the industrial temperature range.
- Remote devices for pressure measurement PDM-2 and pressure/temperature combination PDMT-1 have been designed based on discrete tenso-e.m.f. transducer. Those devices featured original designs, including a patented “Force measuring device” and achieved 1%...1,5% tolerance within 0°C...80°C working temperature range. Device PDM-2 has passed State certification and was recommended for production.

This dissertation presents both theoretical and experimental research results obtained personally by the author. The principal research topic and direction was suggested by Dr. V.O.Romanov (Ph.D. Physics) from V.E.Lashkariov Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Science, and later updated by the Scientific Adviser. The practical research execution belongs to the applicant. The author conducted a literature review and its applied analysis for the discovery of most critical material science methods. The author’s contribution to research and its respective results is instrumental. The applicant has personally performed the following: transversal effect non-linearity study, topologic optimization of the MEMS – mesa-structure, mask optimization for MEMS pressure sensor manufacturing, as well as design and development of secondary transducer circuitry. The author has presented the results of his research at scientific and technology conferences and seminars.

Key concepts and research results have been presented and discussed at: The Seventh All-Union seminar for optic and electro-optic methods and means of transmission, processing, conversion and storing of information (Moscow, 1981), Conference “Magneto-sensitive devices” (Abovian, 1985), IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and nanotechnology" (ELNANO – 2017, Kyiv, 2017).

Research results are presented in 12 scientific papers, published in 11 scientific magazines/journals and received one patent for a force measurement device.

This dissertation consists of an introduction, 5 chapters, conclusions, literature references, and appendix. Its spreads over 128 pages, includes 42 figures and 2 tables. Literature lists 148 references at 15 pages. The appendix has 4 pages and contains auxiliary materials that do not belong to the main body of the dissertation.

The First Chapter is dedicated to analytical review of phenomena causing transversal effects. The discussion is carried out in terms of conductivity anisotropy, which is described as non-collinearity of electrical field and current vectors. Such approach allows for usage of similar formal models while analyzing various effects. Specifically, cases of deformation- and magnetic field-induced anisotropy are analyzed. A Parameter of Anisotropy (PA) is introduced and local and absolute maximums of orientation function of the PA for elastically deformed specimen are determined along with their directive cosines for cubic singony semiconductor materials. Both strong and weak field cases are reviewed and a linear approximation of a tenso-e.m.f. effect is discussed.

The Second Chapter is dedicated to the research of discrete pressure transducers based on tenso-e.m.f. effect. (TET). An original TET design provides its linear compression and eliminates friction and hysteresis caused by the latter. The over-linear transfer function of the TET is approximated by a polynome $E_y = AP_x^2 + BP_x$. Transfer function non-linearity is studied for various materials (n-Si, p-Si, n-Ge) of different orientations ($\{110\}$, $\{100\}$) and the optimum material is

selected for discrete TET's as n-Si {110}, with specific resistance within 1...100 Ohm*cm range. Demonstrated that the TET, being a functional equivalent of a Wheatstone bridge, eliminates the problem of matching temperature dependencies of both impedances and sensitivities of discrete piezo-resistors of the latter. As a result, the former have lower additive error values (a zero pressure offset signal), which remains within 0.2% of the full-scale signal in 253...373 K temperature range. The latter is better than that of the Wheatstone bridge by a factor of 30...40 dB. The dynamic range of an unmounted TET approached 120 dB.

The Third Chapter includes research of transducers based on concentration effects in Ge combined with other natural effects. A number of original devices based on dimensional effects in the strong field case are introduced and studied. Those are differential tenso-transistor with 5-Volt output, magneto-concentration-based displacement transducer, indicators of rotation angle and force with their thresholds controlled by the magnetic field, their operation principle based on the interaction of two effects: oscillistor and magneto-concentration effects.

The Fourth Chapter is dedicated to the research of MEMS tenso-e.m.f.-based Integrated Pressure Transducer (IPT). The following tasks are resolved here: sensing element operation model, optimization of both elastic element topology and sensor design as a whole, sensor technology optimization for additive conversion error minimization within a wide temperature range. The TET has been selected for the sensing element due to its following benefits: its lower, compared to the Wheatstone bridge, offset signal temperature drift, its reduced by a factor of four number of noise sources (contacts), its insensitivity to isotropic surface material tension, and localized nature of the TET as a functional transducer. Anisotropic wet caustic etching has been selected for silicon microfabrication. This method has its anisotropies that leads to over-etching of external corners, which required calculation of a compensatory mask. Measurements of the prototyped batch of MEMS IPT's yielded the following tolerances for the initial offset signal and its temperature drift within 233-373 K range

- 1% and 1%...2%, respectively. These values are more than the order of magnitude better than the respective raw values for a Wheatstone bridge.

In the Fifth Chapter, the design and testing measurements of the devices developed on the TET basis are described. Such commercialized devices are remote manometric transducers PDM-2 and PDMT-1. These devices feature patented by the author thermal compensation unit. The combination device PDMT-1 features a current output; by switching the polarity of the supply voltage the device is switching its pressure or temperature measurement and the output current polarity is switched correspondingly. TET-based electronic scale prototypes have been also developed and tested.

Keywords: silicon, germanium, anisotropy, conductance, transducer, tenso-e.m.f., tenso-effect, MEMS, mechanical parameters.

Перелік умовних позначень, символів та скорочень:

БМКЕ – багатодолинний магніто-концентраційний ефект;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ДТТ – диференціальний тензотранзистор;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина (комп'ютер);

ЕП – електричний пінч-ефект;

ЕТЕ – ефект тензо-е.р.с.;

ІПТ – інтегральний перетворювач тиску;

ІТЕПТ – ІПТ на основі ефекту тензо-е.р.с.;

ІФН – Інститут фізики напівпровідників;

КЕ – концентраційний ефект;

КОН – гідроокис калію;

МЕМС – мікроелектромеханічна система;

МКЕ – магніто-концентраційний ефект;

МПа – мега-Паскаль;

ПА – параметр анізотропії;

ПЕ – пружний елемент;

ПМП/ПМВ – перетворювач механічних параметрів/величин;

ПП – первинний перетворювач;

Тензо-е.р.с. – електро-рухома сила, викликана тиском;

ТЕП – ПП на основі тензо-е.р.с.;

ТК – термокомпенсація;

ТКР – температурний коефіцієнт розширення;

ЧЕ – чутливий елемент;

Ge і Si – германій та кремній, відповідно.

ЗМІСТ

ВСТУП	22
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОПЕРЕЧНИХ ЕФЕКТІВ У БАГАТОДОЛИННИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ	29
1.1. Побудова розрахункової моделі.....	29
1.2. Рішення рівняння біполярної дифузії	30
1.3. Параметр анізотропії.....	32
1.3.1. Природна анізотропія	33
1.3.2. Анізотропія, викликана деформацією.....	33
1.3.3. Анізотропія, викликана магнітним полем	36
1.4. Прояв поперечних ефектів	37
1.4.1. Поперечні концентраційні ефекти	37
1.4.2. Поперечні польові ефекти	3839
1.5. Завдання експериментальних досліджень	40
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	42
Розділ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА СИЛИ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ТЕНЗО-Е.Р.С.....	43
2.1. Постановка завдання.....	43
2.2. Підготовка зразків.....	43
2.2.1. Вибір методу створення омичних контактів	45
2.3. Опис методики досліджень	46
2.4. Обробка експериментальних даних	47
2.5. Аналіз і узагальнення результатів.....	48
2.5.1. Основні складові погрішності ТЕП і шляхи її мінімізації.....	50
2.5.2. Параметри характеристики перетворення	51

2.6. Переваги тензо-е.р.с.-перетворювачів	55
ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	57
Розділ 3. НОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПОПЕРЕЧНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ЕФЕКТИ	58
3.1 Диференціальний тензотранзистор	58
3.1.1 Конструкція і виготовлення ДТТ	58
3.1.2 Принцип дії ДТТ	59
3.2. Перетворювач переміщення на основі магнітоконцентраційного ефекту	61
3.2.1. Конструкція і принцип дії перетворювача	61
3.2.2. Результати дослідження експериментального зразка перетворювача	63
3.3. Перетворювачі на основі осцилісторного ефекту	64
3.3.1 Підготовка зразків і методика експерименту	65
3.3.2. Експериментальні результати	66
3.3.3. Аналіз результатів	68
ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	69
Розділ 4. ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ТЕНЗО-Е.Р.С.....	70
4.1. Постановка завдання.....	70
4.2. Вибір типу чутливого елемента інтегрального перетворювача тиску	72
4.3. Оптимізація топології пружного елемента і конструкції інтегрального перетворювача тиску.....	74
4.4 Мікропрофілювання пружного елемента	77
4.4.1. Особливості лужного анізотропного травлення кремнію.....	77
4.4.2. Опис установки для травлення.....	79

4.4 Компенсація температурного зміни чутливості ІТЕПТ	81
4.5. Питання технології виготовлення ІТЕПТ	83
4.5.1. Групові шаблони для виготовлення ІТЕПТ	83
4.5.2. Діелектричне покриття	83
4.5.3. З'єднання пластин кремнію	84
4.5.4. Блок-схема технологічного циклу виготовлення ІТЕПТ	85
4.6. Результати випробувань тестових зразків	86
4.7. Діагностика напружень в ІТЕПТ	87
ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ	89
Розділ 5. ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ ТЕНЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	90
5.1. Дистанційні перетворювачі тиску	90
5.1.1. Рішення ключових завдань розробки приладів	90
5.1.2. Функціональне призначення і технічні характеристики ПДМ- 2 ...	93
5.1.3. Результати випробувань ПДМ-2	94
5.1.4. Комплексний дистанційний прилад для вимірювання тиску і температури	95
5.1.5. Результати випробувань і застосування дослідних зразків ПДМТ-1	99
5.1. Застосування ТЕП в інших розробках	101
5.2.1 Електронні ваги – експериментальні зразки	102
5.2.2. Компенсація нелінійності навантажувальної характеристики ТЕП	103
ВИСНОВКИ ДО П'ЯТОГО РОЗДІЛУ	107
ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	110
ДОДАТКИ	125

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток електронного приладобудування, Інтернет речей (IoT), побутових і промислових технологій зумовлює зростаючу потребу у первинних перетворювачах (ПП) фізичних величин і водночас вимагає оптимізації їхнього застосування у вимірювальних пристроях. Крім традиційних вимог (широкий вимірювальний діапазон, надійність, низька собівартість, можливість заміни без наступного калібрування вторинного перетворювача) до сучасних ПП висувають вимоги сумісності з технологіями мікроелектроніки, низького енергоспоживання, малих габаритів та маси, можливості використання в автономних мобільних та імплантованих системах.

Група приладів, яку визначають як *перетворювачі механічних параметрів* (ПМП), є численною і дуже різномірною, в якій найбільш вивченими і розповсюдженими є тензорезистори. Основні недоліки тензорезисторів – це значна розбіжність параметрів та їхні зміни під впливом зовнішніх факторів, що потребує заходів із компенсації останніх у вторинних перетворювачах.

Використання поперечних тензоефектів для побудови перетворювачів механічних параметрів дозволяє позбавитися низки недоліків тензорезистивних ПП, що надає таким низку переваг перед останніми. Зокрема, використання ефекту т. р. с. дозволяє отримати функціональний аналог тензорезисторного моста, який позбавлено істотних джерел погрішностей останнього, зі значно зниженими складовими температурного дрейфу нульового сигналу. Теорію побудови ПП на основі поперечних тензоефектів було закладено українськими вченими в Інституті фізики напівпровідників ім. Лашкарьова і яку активно розвивали у Національному технічному університеті України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського».

Якісно новий напрямок у розробці та виробництві ПП відкривають електронні технології виготовлення мікроелектромеханічних систем (МЕМС) вимірювально-виконавчих пристроїв на монокристалічному кремнії [1,2,5-7]. Використання кремнію як механічного матеріалу зумовлено сукупністю його властивостей і механічних параметрів, які в монокристалі є передбачуваними і відтворними. Перевершуючи за значенням межі пружності нержавіючу сталь, кремній має щільність, близьку до щільності алюмінію [51,138]. Елементи кремнієвої мікромеханіки, які не проявляють механічної втоми, можуть працювати на частотах до кількох мегагерц за допустимих робочих тисків, що перевищують 350 МПа. Корозійна стійкість, широкий діапазон робочих температур є передумовами застосування кремнію як елемента механіки [40,66,11,113]. Використання анізотропного травлення монокристалічного кремнію дозволяє здійснити перехід від традиційної площинної конструкції твердотілого електронного елемента до об'ємної та отримати потрібну геометричну форму ПП. Водночас відкриваються перспективи інтеграції ПП, електронних схем формування та обробки сигналу, схем компенсації впливних величин на одному кристалі монокристалічного кремнію [9]. На сьогодні розробка сенсорів та виконавчих пристроїв за технологією МЕМС є самостійною галуззю мікроелектроніки [10–13].

Поглиблення наукових фізико-технічних уявлень про зв'язок конструктивних характеристик ПП на основі поперечних тензоефектів та їхніх параметрів, перетворення з метою подальшого формування інженерних підходів до проектування електронних пристроїв для відповідних вимірювальних задач – основне наукове завдання проведених досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалось на кафедрі мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за Державною цільовою науково-технічною

програмою розроблення і створення сенсорних наукоємних продуктів на 2008-2017 роки (Постанова Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2007 р. № 1395), з урахуванням пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки (Закон України Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки від 12 жовтня 2010 року № 2519-17), згідно переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942), середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2012 – 2016 роки (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 березня 2012 р. № 294) та в рамках НДР за пріоритетною програмою Міністерства освіти і науки України, напрям 06 «Нові речовини і матеріали»: НДР «Розробка технології і створення твердотільної сенсорної системи на основі двухпортового резонатора та масиву наноструктур» (№ 2817-п, Держ. реєстраційний № 0115U000403), НДР «Розробка та створення пристроїв фільтрації електричних сигналів на основі мікроелектромеханічних резонаторів для організації функціональних МЕМС-структур» (№ 2467, Держ. реєстраційний № 0111U003243).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розроблення фізичних основ побудови перетворювачів механічних величин з використанням поперечних тензоефектів. Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі основні завдання, вирішення яких представляється до захисту:

1. дослідження і систематизація ефектів, які супроводжують анізотропію провідності, індуковану деформацією кристалів Ge і Si;
2. розробка топології, конструкції і технології виготовлення МЕМС інтегрального перетворювача тиску на основі ефекту тензо-е.р.с.;
3. дослідження електрофізичних властивостей перетворювача сили на основі ефекту тензо-е.р.с., виявлення чинників, які визначають метрологічні властивості характеристик;

4. дослідження механічних перетворювачів, заснованих на концентраційних ефектах у напівпровідникових кристалах Ge та Si;
5. розробка вторинних манометричних перетворювачів. Оптимізація конструктивних і схемних рішень для побудови дистанційних вимірювальних приладів на основі тензо-е.р.с.-перетворювачів.

Об'єкт досліджень – характеристики поперечних ефектів, викликаних наведеною анізотропією в Si та Ge.

Предмет досліджень – перетворювачі механічних величин на основі поперечних ефектів у Si та Ge. Результатом досліджень є розробка як МЕМС інтегрального перетворювача тиску, так і промислового приладу для вимірювання тиску рідких середовищ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися феноменологічне узагальнення поперечних ефектів, аналітичний розрахунок провідності в напівпровідниках кубічної сітгонії, експериментальне дослідження характеристик перетворювачів з метою виявлення джерел системних похибок перетворення і технологічна оптимізація конфігурації і процесів виготовлення МЕМС, спрямована на мінімізацію останніх, режими хімічного травління Ge та Si, методи створення контактів (термокомпресія) і складення датчиків, комп'ютерні методи розроблення шаблонів для виготовлення меза-структур, методи кремнієвої технології: дифузія, епітаксія, щавлення, відпалення та ін., модуляційно-поляризаційна діагностика термонапружень.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше досліджено характеристики нелінійності ефекту тензо-е.р.с. у кристалах кремнію і германію в широкому діапазоні концентрацій ($4 \cdot 10^{19} \dots 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$) для різних кристалографічних орієнтацій, що дозволило удосконалити лінійну модель ефекту тензо-е.р.с. введенням апроксимуючого полінома.

2. Запропоновані та досліджені оригінальні принципи побудови дискретних перетворювачів сили зі зниженими гістерезисом і аддитивною складовою похибки перетворення, які знайшли застосування у промислових вимірювальних приладах.
3. Запропоновано та досліджено інтегровані структури перетворювача тиску у МЕМС виконанні, які мають підвищені стабільність і точність характеристик перетворення в широкому діапазоні температур.
4. Виявлено і досліджено низку поперечних концентраційних ефектів у германії і запропоновано нові типи перетворювачів, таких як диференційний тензотранзистор, безконтактний лінійний датчик переміщень, порогові датчики кута повороту і сили на основі осцилісторного ефекту.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами досліджень розроблено такі прилади:

1. На основі тензо-е.р.с. перетворювачів (ТЕП) тиску розроблений та виготовлений МЕМС сенсор із зниженою, в порівнянні з існуючими перетворювачами загальнопромислового застосування, похибкою перетворення у промисловому діапазоні температур.
2. На основі дискретних ТЕП розроблені дистанційні прилади для вимірювання тиску ПДМ-2 і комбінації тиску та температури ПДМТ-1. Використання в цих приладах оригінальних технічних рішень, у тому числі, за авторським свідоцтвом на "Пристрій для виміру сил", забезпечили досягнення класу точності 1%...1,5% в діапазоні температур 0°C...80°C. Прилад ПДМ-2 пройшов Державні випробування і був рекомендований до серійного випуску.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, проведених автором самостійно. Головну ідею роботи та напрям досліджень було запропоновано д.ф.-м.н. Романовим В.О. з ІФН ім В.Є.Лашкарьова НАН України що, згодом,

було доповнено науковим керівником, а їх практичне втілення належить здобувачеві. Роль автора дисертаційної роботи полягає в узагальненні і прикладному аналізі наукової літератури з метою виявлення найбільш важливих ефектів і характеристик матеріалів для практичного застосування. У спільних роботах авторові повністю належить отримання експериментальних результатів та їх обробка, участь у постановці завдань, інтерпретації і узагальненні отриманих результатів. Внесок автора в проведення досліджень і отримання результатів, приведених в дисертації, є визначальним. Особисто здобувачем виконані: топологічна оптимізація меза-структури МЕМС, запропоновані конструкція і технологічний процес виготовлення шаблонів для технології виробництва МЕМС ІПТ, а також розробка і розрахунок схем вторинних перетворювачів. Автор роботи особисто представляв результати досліджень на науково-технічних конференціях і семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень докладалися та обговорювалися на: сьомому Всесоюзному семінарі з оптичних і електрооптичних методів та засобів передачі, переробки, перетворення і зберігання інформації (м. Москва, 1981 р.), конференції "Напівпровідникові магніточутливі прилади" (м. Абовян, 1985), IEEE 37th International Scientific Conference "Electronics and nanotechnology" (ELNANO – 2017, м. Київ, 2017).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (1 з яких у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз даних), та отримане авторське свідоцтво на пристрій для виміру сил.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатка. Вона містить 128 сторінок, 42 рисунки і 2 таблиці. Список використаної літератури має 148 найменувань на 15 сторінках. Додаток

викладений на 4-ох сторінках та містить додаткові матеріали, що не увійшли до основної частини дисертації.

Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОПЕРЕЧНИХ ЕФЕКТІВ У БАГАТОДОЛИННИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ

Принципи дії перетворювачів, запропонованих і досліджених у цій дисертації, засновано на поперечних ефектах у напівпровідниках. Ефекти цієї групи є специфічними і визначальними для описаних перетворювачів, хоча поряд із ними тут проявляється також низка інших ефектів. Ті, яких не стосуються поперечні ефекти явища, коротко розглянуто у відповідних розділах. Передумовою до виникнення поперечних ефектів є анізотропія електропровідності.

Поперечні ефекти в напівпровідниках характеризуються наявністю градієнтів концентрації носіїв струму і/або компонент електричного поля, ортогональних напрямку прикладеного поля [83]. Теоретичний розгляд цих ефектів зводиться до аналізу процесів біполярного переносу носіїв в анізотропному напівпровіднику. Тут і далі анізотропія електропровідності, незалежно від фізичної першопричини, трактується, згідно [15], у широкому сенсі як неколінеарність векторів електричного поля і струму.

Різноманіття всіляких поперечних ефектів у напівпровідниках і громіздкість точного опису їхніх приватних проявів не дозволяють повністю висвітлити в зазначеній роботі всі аспекти таких явищ. Тому нижче наведено лише основні положення, необхідні для постановки завдання та інтерпретації експериментальних результатів.

1.1. Побудова розрахункової моделі

Розгляд процесу проходження електричного струму через обмежений напівпровідник із біполярною анізотропною електропровідністю і рішення

рівняння дифузії в такому зразку наведено в [36]. Розрахункова модель має низку обмежень і умов, що забезпечують точне рішення задачі і не впливають на спільність картини:

- зразок є нескінченною в напрямках x, z пластинкою біполярного напівпровідника шириною $2h$ ($-h < y < h$);
- тензори електронної $\widehat{\sigma}_n$ і діркової $\widehat{\sigma}_p$ електропровідностей є невідродженими в площині xy , причому ox і oy є неколінеарними головним осям цих тензорів;
- напівпровідник є власним, тобто:
 $n_0 = p_0 = n_i$;
- часи життя електронів та дірок дорівнюють - $\tau_n = \tau_p = \tau$;
- щільність повного струму в поперечному напрямку дорівнює нулю - $j_y = 0$.

Якщо в такому зразку протікає електричний струм у напрямку ox , то внаслідок $\widehat{\sigma}_{xy} \neq 0$ ($\widehat{\sigma} = \widehat{\sigma}_n + \widehat{\sigma}_p$) виникає поперечне електричне поле E_y , що компенсує дрейфову складову такої величини як $j_y = 0$. Але в силу

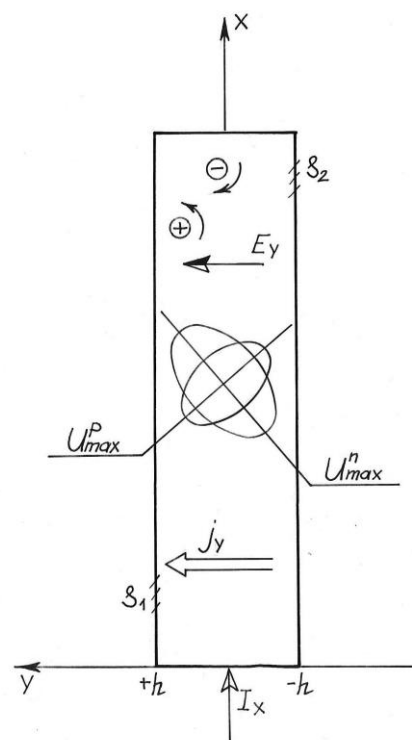


Рис.1.1 Проходження струму через біполярний анізотропний напівпровідник (розрахункова модель).

того, що поперечні компоненти тензорів $\sigma_n^y \neq \sigma_p^y$, струми j_{ny} і j_{py} будуть відмінні від нуля, і виникають потоки носіїв і градієнти концентрації n і p у напрямку oy (рис.1.1).

1.2. Рішення рівняння біполярної дифузії

З урахуванням наведених припущень із виразів для щільності електронного та діркового струмів, рівнянь безперервності та співвідношення Ейнштейна можна отримати:

$$\frac{\partial p}{\partial t} - D \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - a_{yx} \frac{eD}{2kT} E_x \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{p-p_i}{\tau} = 0, \quad (1.1)$$

$$\text{де } D = \frac{2D_{yy}^n D_{yy}^p}{D_{yy}^n + D_{yy}^p}; \quad a_{yx} = \frac{u_{xy}^n}{u_{yy}^n} - \frac{u_{xy}^p}{u_{yy}^p}. \quad (1.2)$$

Рівняння (1.1) є узагальненням рівняння біполярної дифузії, відрізняючись від нього членом, що виникає внаслідок анізотропії напівпровідника, який виражає наявність однорідного електричного поля $a_{yx}E_x$, направлено вздовж осі oy .

Якщо швидкості поверхневої рекомбінації на бічних гранях зразка, які відповідають $y = \pm h$, дорівнюють s_1 і s_2 відповідно, то граничні умови для інтегрування рівняння (1.1) записують у вигляді:

$$j_{py}(\pm h) = \pm e s_{1,2} [p(\pm h) - p_i], \quad (1.3)$$

де $s_{1,2}$ замінюється на s_1 чи s_2 для граней $y = +h$ і $y = -h$, відповідно.

Як показано в [36], інтегрування рівняння (1.1) з граничними умовами (1.3) призводить до виразу для стаціонарної концентрації носіїв виду:

$$p(y) = p_i + \frac{p_i \gamma}{\xi(\gamma)} \Psi(\beta, \gamma, S_{1,2}), \quad (1.4)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{a_{yx}}{4} \frac{eL}{kT} E_x,$$

$$\beta = \frac{h}{L}, \quad (1.5)$$

$$S_{1,2} = \frac{s_{1,2}L}{D}.$$

Повний струм через зразок дорівнює:

$$I_x = 2hE_x \Sigma(\gamma), \quad (1.6)$$

$$\text{де } \Sigma(\gamma) = \sigma_i^* \Theta(\beta, \gamma, s_{1,2}),$$

$$\sigma_i^* = eu^* p_i, \quad (1.7)$$

$$u^* = \frac{e}{kT} [D_{xx}^n + D_{xx}^p - \frac{D_{xy}^n + D_{xy}^p}{D_{yy}^n + D_{yy}^p}].$$

Тут наведено лише загальний вигляд отриманих у [36] громіздких виразів для $p(y)$ і I_x , необхідних для аналізу основних результатів теорії. Функції Ψ і Θ з (1.4) і (1.6) підкреслюють залежність фізичної картини від визначальних параметрів моделі $\beta, \gamma, S_{1,2}$.

Оскільки $\frac{a_{yx}}{2} E_x$ з точністю до знака має сенс ефективного поля, що діє в напрямку $0y$, то 2γ є безрозмірним електричним полем, виміряним в одиницях дифузного поля $E_L = \frac{kT}{eL}$. Параметр β є геометричним фактором, тобто відношення ширини зразка до дифузійної довжини зазначає розмірний характер ефекту. $S_{1,2}$ – наведені швидкості поверхневої рекомбінації на протилежних гранях. У формулі (1.6) $\Sigma(\gamma)$ має сенс ефективної біполярної питомої електропровідності зразка, а σ_i^* є електропровідністю в рівноважних умовах. Значення цих функцій збігаються лише за $\beta \rightarrow \infty$ чи $S_1, S_2 \rightarrow \infty$. В інших випадках Σ відрізняється від σ_i^* навіть за $E_x \rightarrow 0$.

Дослідження формул (1.4) і (1.6) для граничних випадків, а також інтерпретація параметра a_{yx} , що входить у (1.5.), дозволяють отримати важливі практичні результати.

1.3. Параметр анізотропії

Прояви розглянутих ефектів пов'язано з наявністю поперечної компоненти електричного поля E_y . Ця компонента, своєю чергою, однозначно залежить від параметра a_{yx} , що входить у формулу (1.2). Таким чином, параметр a_{yx} , який отримав назву параметра анізотропії (ПА), відіграє визначальну роль за аналізу всіх ефектів, зумовлених особливостями біполярної дифузії і дрейфу носіїв у напівпровіднику з анізотропною електропровідністю. Тому розгляду конкретних

ефектів передусє аналіз цього параметра. У разі природного анізотропного напівпровідника і для анізотропії, наведеної деформацією, $a_{yx}=a_{xy}$, якщо ж анізотропію наведено магнітним полем, то $a_{yx}=-a_{xy}$. Відзначивши властивості симетрії ПА, в подальшому будемо використовувати позначення a .

1.3.1. Природна анізотропія

У природних анізотропних кристалах ПА залежить від кристалографічної орієнтації пластини. Якщо головні напрямки тензорів рухомостей носіїв збігаються з кристалографічними осями, то вираз для ПА має вигляд [9]:

$$a = \left(\frac{u_b^n}{u_a^n} - \frac{u_b^p}{u_a^p} \right) \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\left(\sin^2 \theta + \frac{u_b^n}{u_a^n} \cos^2 \theta \right) \left(\sin^2 \theta + \frac{u_b^p}{u_a^p} \cos^2 \theta \right)}, \quad (1.8)$$

де θ — кут між головною кристалографічною віссю і віссю зразка.

З (1.8) видно, що ПА дорівнює нулю в зразках, вирізаних вздовж головних кристалографічних осей. Ефект також відсутній за довільної кристалографічної орієнтації, якщо еліпсоїди рухомостей електронів і дірок орієнтовані однаково та їхні ексцентриситети дорівнюють один одному.

1.3.2. Анізотропія, викликана деформацією

У напівпровідниках кубічної симетрії макроскопічна анізотропія провідності може бути викликана пружною деформацією, якщо напрям докладання деформуючої сили не збігається з напрямками головних кристалографічних осей. Такий спосіб створення анізотропії вельми продуктивний при дослідженні напівпровідників, оскільки він дозволяє просто управляти ступенем і характером анізотропії, причому з'являється можливість реалізувати просторове розподілення ПА, який або взагалі неможливо, або важко отримати іншими методами [96,113]. Анізотропію в цьому випадку, як правило, пов'язано зі зняттям виродження зонної структури напівпровідника [15,36,121]. Феноменологічно при цьому розглядають п'єзорезистивний ефект, який описує

тензор 4-го рангу, причому в кристалах кубічної симетрії тільки три компоненти цього тензора ($\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{44}$) є незалежними [99,139].

За пружної деформації одноосового стискання напівпровідника в напрямку OX ПА, в лінійному по P_x наближенні ПА має вигляд [12,139]:

$$a = (\Pi_{xy,xx}^n - \Pi_{xy,xx}^p) * P_x, \quad (1.9)$$

де $\Pi_{xy,xx}^n, \Pi_{xy,xx}^p$ – поперечні компоненти тензорів п'єзоопору для електронів та дірок;

P_x – напруження, викликане силою, прикладеною вздовж осі OX .

Компоненти тензора п'єзоопору, виражені через свої значення в головних кристалографічних осях, для германію і кремнію (клас симетрії – $m\bar{3}m / Fd\bar{3}m$) визначені в [55,138]:

$$\Pi_{xy,xx} = (\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2), \quad (1.10)$$

де $\Pi_{11} = \Pi_{xx,xx}; \Pi_{12} = \Pi_{xx,yy}; \Pi_{44} = \Pi_{xy,xy};$

(l_1, m_1, n_1) и (l_2, m_2, n_2) – направляючі косинуси кутів між головними кристалографічними напрямками і відповідними осями зразка.

Лінійна комбінація головних п'єзоелектричних коефіцієнтів у правій частині (1.10) визначається конкретним матеріалом зразка, його типом провідності і питомим опором. Перша дужка в неявному вигляді містить температурну залежність і характеристики нелінійності ефекту. Друга дужка – орієнтаційний член – визначається вирізкою зразка і характеризує ефективність перетворення.

Одним із завдань дослідження наведеної анізотропії, викликаной деформацією, є визначення оптимальної орієнтації граней зразка, що забезпечує максимальне значення ПА. Цю задачу вирішено в [138].

Існує дванадцять просторово-симетричних напрямків, в яких досягається абсолютний максимум модуля тригонометричного полінома з (1.10), наприклад, за наступної орієнтації:

$$\begin{pmatrix} 0,305 & 0,305 & 0,902 \\ -0,638 & -0,638 & 0,432 \\ 0,707 & -0,707 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

значення полінома дорівнює $\pm 0,281$. Помимо абсолютних екстремумів розглянута функція має низку локальних екстремумів. Серед них практичний інтерес являє собою сімейство екстремумів, розташованих у дванадцятьох напрямках типу:

$$\begin{pmatrix} 0,924 & 0,383 & 0 \\ -0,383 & -0,924 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

Значення полінома для цієї групи дорівнює $\pm 0,25$. На рис. 1. 2 наведено вирізки зразків, що відповідають двом розглянутим випадкам.

Для зразків, виготовлених з невідроджених германію та кремнію, можна спростити вираз $(\Pi_{11} - \Pi_{12} - \Pi_{44})$, вилучивши з нього всі коефіцієнти, крім одного $[141]$. Тоді ця дужка набуде вигляду:

$$\begin{aligned} &\simeq -\Pi_{44} \text{ — для n-германію,} \\ &\simeq -\Pi_{44} \text{ — для р-германію,} \\ &\simeq 1,5\Pi_{11} \text{ — для n-кремнію,} \\ &\simeq -\Pi_{44} \text{ — для р-кремнію.} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Залежності актуальних компонент тензора п'єзоопору від температури в напівпровідниках, близьких до власних, визначено в [133]. У цій роботі і в низці інших [13,127] показано, що для слабо легованих германію n- і р-типу і кремнію

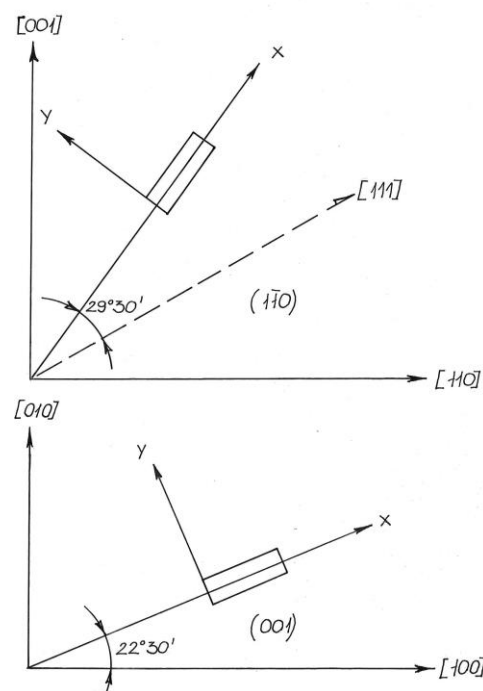


Рис. 1.2 Два типи орієнтації зразка, що відповідають екстремальним значенням параметра анізотропії.

р-типу залежність Π_{44} від температури в діапазоні 70–350К описують виразом $\propto 1/T$. Температурна залежність для кремнію n-типу є більш складною, але в діапазоні 250–350К характер залежності $\propto 1/T$ зберігається.

Показано також [140], що підвищення вкладу домішкового розсіяння, за концентрацій домішок, починаючи орієнтовно з $1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, призводить до того, що величини п'єзоефіцієнтів починають зменшуватися, а залежність їх від температури проявляється слабкіше, ніж $1/T$. В області концентрацій $1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ПА практично не залежить від температури. До того ж для високолегованих напівпровідників втрачають справедливість співвідношення (1.13).

1.3.3. Анізотропія, викликана магнітним полем

Формальна аналогія явищ, які супроводжують проходження електричного струму через анізотропний напівпровідник з біполярної провідністю і особливостей електропровідності біполярного ізотропного напівпровідника, поміщеного в магнітне поле, дозволяє проводити розгляд останнього випадку в термінах анізотропії, наведеної магнітним полем.

Якщо напівпровідник поміщено в схрещені електричне та магнітне поля, то ПА визначають виразом [15]:

$$a(H) = (u_n^* + u_p^*) \frac{H}{c}, \quad (1.14)$$

де u_n^*, u_p^* – холлівські рухомості електронів та дірок,
 c – швидкість світла.

У роботах [14,45] розглянуто випадок, коли напрямок магнітного поля лежить у площині xy зразка. У цьому випадку напрямок електронно-діркового потоку не залежить від знака магнітного поля і ПА дорівнює:

$$a(H) \propto H_x * H_y = \frac{H^2}{2} \sin 2\varphi, \quad (1.15)$$

тобто ефект парний за полем.

Ще один випадок виникнення наведеної анізотропії, парної по магнітному полю, показано в [103]. Це явище, специфічне для багатодолинних напівпровідників, виникає навіть за колінеарності полів і його описують залежністю:

$$a(H) \propto H^2. \quad (1.16)$$

1.4. Прояв поперечних ефектів

Залежно від значення параметра формули (1.4), (1.6) описують якісно різні фізичні ефекти. У зв'язку з цим доцільно розглянути окремо випадки сильного і слабого полів і відповідні цим випадкам концентраційні та польові ефекти.

1.4.1. Поперечні концентраційні ефекти

Критерій сильного поля можна записати у вигляді:

$$|\gamma| = |a \frac{eL}{4kT} E_x| \gg 1. \quad (1.17)$$

Практичне виконання такої умови за малих значень ПА є можливим у напівпровідниках з великою дифузійною довжиною, поміщених у середні і сильні поля E_x . У цьому випадку, як показано в [121], розподіл носіїв по перетину зразка може значно відрізнятись від рівноважного [67]. Якщо при цьому швидкості поверхневої рекомбінації s_1 і s_2 є малими, то в зразку виникають вузькі приповерхневі області збагачення, в яких концентрація $n, p \gg n_i$ і змінюється за законом:

$$p(y, \gamma) \propto \exp\left(-2\gamma \frac{y+h}{L}\right) \quad (1.18)$$

і великі області збіднення, в яких $n, p \ll n_i$ і виражається залежністю:

$$p(y, \gamma) \propto \exp\left(\frac{h-y}{2\gamma L}\right). \quad (1.19)$$

Основний вклад у значення повного струму I_x дає струм, що протікає в області

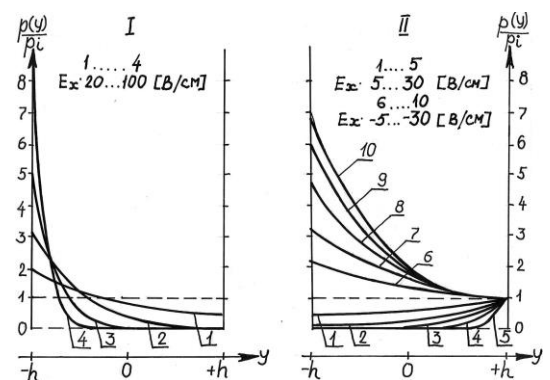


Рис. 1.3 Поперечний розподіл концентрації носіїв при КЕ (електричний піньч).

I – $S_1=S_2=10^2$; II – $S_1=10^2$, $S_2=10^4$ [см/с]

збагачення, де його щільність є максимальною. Тут же існує значний поперечний градієнт концентрації носіїв і щільності струму. Явище «стягування» носіїв струму у вузький канал є концентраційним ефектом (КЕ). Що менше виражений КЕ, то менші s_1 і s_2 . У сильних полях при КЕ має місце насичення струму, пов'язане зі зменшенням повного числа носіїв, які рекомбінують при винесенні на поверхню.

При гранях зразка, які різко відрізняються за умовами рекомбінації, $\max(s_1 s_2) \gg \min(s_1 s_2)$, його вольт-амперна характеристика стає асиметричною, аж до випрямляючої. На рис.1.3 і 1.4 наведено криві, побудовані в [36] за результатами асимптотичного аналізу формул (1.4) і (1.6). Ці залежності добре узгоджуються з експериментальними результатами, отриманими в [15,121]. Характеристичні часи КЕ, що визначають квазістаціонарність процесів при КЕ, залежать від об'ємної швидкості біполярної рекомбінації, швидкостей поверхневої рекомбінації на гранях $y = \pm h$ і часу поперечного дрейфу носіїв і складають $10^{-3} \dots 10^{-5} \text{с}$.

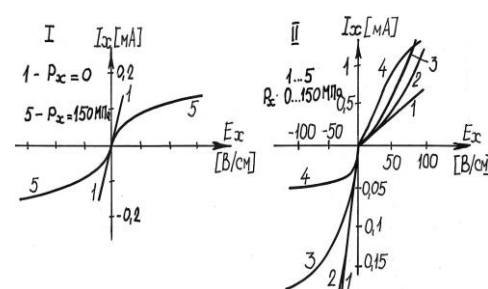


Рис. 1.4 Вольт-амперна характеристика зразка при КЕ.

I – $S_1=S_2=10^2$; II – $S_1=10^2$, $S_2=10^4$ [см/с]

У цій роботі використовуються терміни *електричний пінч* (ЕП) і *магнітоконцентраційний ефект* (МКЕ) для КЕ, викликані деформацією і магнітним полем відповідно.

1.4.2. Поперечні польові ефекти

Критерій слабого поля описують співвідношенням:

$$|\gamma| = \left| a \frac{eL}{4kT} E_x \right| < 1. \quad (1.20)$$

Цю умову можна реалізувати в слабких полях E_x , що тягнуть, або в домішкових напівпровідниках з малою дифузійною довжиною за помірних і високих температур. У таких зразках перерозподіл носіїв по перетину зразка є

несуттєвим, а поперечна е. д. с., що виникає і яка пропорційна деформації, служить інформативним параметром. З огляду на це, поклавши у виразі, що описує умову, $j_y = 0$:

$$e(D_{yy}^n - D_{yy}^p) \frac{\partial p}{\partial y} + \sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y = 0 \quad (1.21)$$

значення дифузійної компоненти $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$, після розв'язання (1.21) щодо E_y , отримаємо:

$$E_y = - \frac{nu_{xy}^n + pu_{xy}^p}{nu_{yy}^n + pu_{yy}^p} * \frac{l_y}{l_l} * E_x. \quad (1.22)$$

Проведений аналіз поперечних ефектів не втрачає своєї застосовності за переходу від найбільш загального випадку біполярної провідності власного напівпровідника до монополярної нагоди. При цьому для домішкового напівпровідника вираз (1.22) можна спростити, наприклад, для напівпровідника n-типу:

$$E_y = - \frac{u_{xy}^n}{u_{yy}^n} * \frac{l_y}{l_l} * E_x. \quad (1.23)$$

Перехід до розгляду домішкових напівпровідників викликано тим, що у власному напівпровіднику критерій (1.20) виконується тільки для досить малих значень E_x . Поперечна е. д. с. E_y , викликана деформацією, отримала назву *тензо-е.р.с.*, або *п'єзо-е.р.с.* [50,105], а сам ефект – ефект тензо-е.р.с. (ЕТЕ). Останній подібний до ефекту Холла в разі анізотропії, наведеної магнітним полем.

Збільшення е. д. с. E_y за рахунок геометричного фактора $\frac{l_y}{l_x}$ тут обмежено значенням останнього 0,3...0,5. Так само як і в родинному ефекті Холла, за великих значень істотним є закорочення бічних електродів струмовими.

Значення $\frac{a_{yx}}{2} = \frac{u_{xy}}{u_{yy}}$ для невідроджених напівпровідників за температур, близьких до 300К, складають /15/:

$$\begin{aligned} &3,8 \cdot 10^{-41} / \text{МПа} (n); \\ &-2,9 \cdot 10^{-41} / \text{МПа} (p) \text{ – для германію}; \\ &-3,9 \cdot 10^{-41} / \text{МПа} (n); \\ &-3,7 \cdot 10^{-41} / \text{МПа} (p) \text{ – для кремнію}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Параметр β , що грає визначальну роль за поперечних концентраційних ефектів, у випадку слабкого поля може бути вилученим із розгляду, внаслідок чого польові ефекти не виявляють розмірного характеру. Характеристичні часи польових ефектів визначаються часом міждолинної релаксації, який за 300К становить 10^{-11} с.

1.5. Завдання експериментальних досліджень

Наявні припущення щодо того, що компоненти тензора п'єзоопору в (1.9) і відношення $\frac{u_{xy}}{u_{yy}}$ в (1.23) не залежать от механічного напруження P_x , призводять до лінійного наближення для ПА і придатні для якісних та оцінних розрахунків. Насправді докладний опис реальних процесів набагато складніший [101] і не завжди теоретичний опис є практично продуктивним із низки причин. Основна з них полягає в тому, що конкретні значення параметрів і констант, які використовують у теоретичній моделі, визначаються лише після зіставлення з експериментом. Проте якісні залежності, які одержують за теоретичного аналізу, є досить інформативними. Варіант розрахунку, що

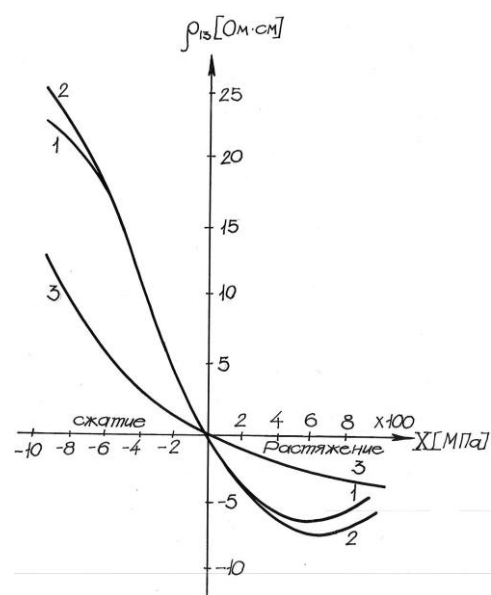


Рис. 1.5 Залежність поперечної компоненти тензора питомого опору від величини одновісної деформуючої напруги.

враховує нелінійність процесів, які протікають за деформації невиродженого германію, наведено в [61]. Отримані в [61] залежності поперечної компоненти тензора питомого опору від величини одноосової деформуючої напруги наведено на рис.1.5. На жаль, у цій роботі є відсутнім експериментальне підтвердження отриманих залежностей.

Високий ступінь подібності електрофізичних властивостей германію та кремнію [10,117] дає підставу припустити, що характер залежностей для кремнію буде подібним до зображеного на рис.1.5. Разом із цим, для практичного використання описаних ефектів у ПМВ необхідно знати їхні докладні кількісні характеристики, які можна отримати тільки за експериментальних досліджень.

Оскільки значення a_{xy}^n і a_{xy}^p у германії розрізняють за знаком (1.24), де біполярний ПА, визначений за формулою (1.2), буде мати абсолютне значення, яке переважає як таке для кремнію, де a_{xy}^n і a_{xy}^p одного знаку, орієнтовно в 1,5 рази. Ця різниця є принциповою, оскільки всі поперечні деформаційні ефекти за біполярної провідності будуть відрізнятися у германії і кремнії тією ж мірою, що робить практично доцільним використання кремнію в приладах, які використовують монополярну провідність, де вклади електронної та діркової компонент не компенсують один одного. З цієї причини, а також з огляду на значні відмінності в умовах спостереження, а також конкретні прояви польових і концентраційних ефектів, їхні дослідження проведено на різних об'єктах і описано, відповідно, в розділах 2 і 3.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

1. Конкретний вид поперечних ефектів у напівпровідниках за наведеної анізотропії провідності визначається геометрією і кристалографічною орієнтацією зразка, параметрами вихідного матеріалу і станом поверхні (у випадку напівпровідників – із власною провідністю). Поперечні ефекти можуть проявлятися у вигляді концентраційних (ЕП, МКЕ) і потенційних (ЕТЕ, ефект Холла) градієнтів, ортогональних напрямку прикладеного поля, а також їхніх комбінацій. Відмінними рисами КЕ є нелінійність вольт-амперної характеристики зразка і розмірний характер ефекту.

2. У германії та кремнії існує два типи кристалографічних орієнтацій, що являють собою практичний інтерес з точки зору поперечних тензоефектів, порівнянних за досягнутим значенням модуля ПА, кожен з яких являє собою сімейство з дванадцяти еквівалентних кристалографічних напрямків.

3. За поперечних тензоефектів у разі біполярної провідності орієнтації еліпсоїдів рухомостей електронної та діркової компонент взаємно підсилюють один одного в германії і послаблюють у кремнії. З цієї причини використання кремнію є доцільним лише за монополярної провідності зразка.

1. Аналітичне визначення точних значень ПА з урахуванням нелінійності вимагає рішення диференціальних рівнянь четвертого порядку і вище, а також ітераційного експериментального уточнення значень параметрів моделі. Водночас досить продуктивним шляхом отримання кількісних характеристик, необхідних для практичного використання поперечних ефектів, є експериментальні дослідження певних орієнтацій ЧЕ.

Розділ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА СИЛИ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ТЕНЗО-Е.Р.С.

2.1. Постановка завдання

Як зазначено в розділі 1, прояв поперечних ефектів у напівпровідниках і, зокрема, ефекту тензо-е.р.с., визначається низкою факторів. Ефект тензо-е.р.с. у германії порівняно добре теоретично і експериментально вивчено. Водночас використання кремнію як вихідного матеріалу для виготовлення ПМВ видається більш перспективним з огляду на вдале поєднання високих механічних властивостей і простоти технології кремнієвих приладів. При цьому для практичного застосування перетворювачів на ефекті тензо-е.р.с. необхідно знати детальні характеристики ефекту. Останні є предметом дослідження у цьому розділі.

2.2. Підготовка зразків

Для дослідження ефекту тензо-е.р.с. було виготовлено зразки тензо-е.р.с.-перетворювачів (ТЕП) єдиної конструкції (рис. 2.1). Формування зразків ТЕП проводили груповим методом із попередньо орієнтованої пластини кремнію перетином 4x10 мм довільної довжини (20 ... 50 мм). Виступи на пластині виготовляли за допомогою спеціального шліфувального інструменту – це два алмазні диски із зазором між ними в 1 мм. Після цього пластину розрізали на окремі зразки.

Зразки шліфували, а потім травили в травителі з азотної і плавикової кислот у співвідношенні 5: 1 упродовж 3–4 хвилин для видалення механічно порушеного шару. Потім на лицьовій грані кожного зразка виготовляли контактні майданчики, після чого зразки клеювали при невеликому одноосьовому

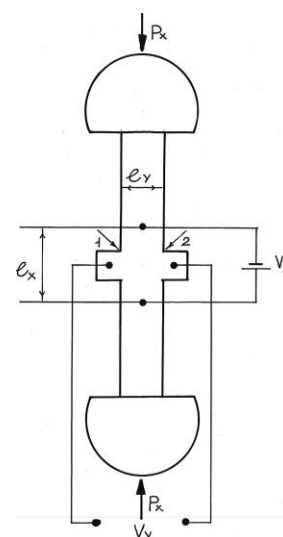


Рис.2.1 Основна конструкція тензо-е.р.с. перетворювача

стисканні (1...2Н) у 1 порожнині двох напівсферичних опор, виготовлених із відшліфованих до висоти 3 мм сталевих кульок діаметром 5 мм. Порожнини в кульках виготовляли на електроерозійному верстаті. Застосування для вклейки зразків бакелітового компаунда з наповнювачем із порошка карбїду кремнію, що полімеризується, забезпечує вирівнювання по перетину ТЕП навантаження, що прикладається до нього, за рахунок формування під торцем зразка шару, що відповідає профілю торця і дна порожнини в опорі. Випробування ТЕП на навантаження до 400 МПа, приведених до перетину зразка, показало, що за таких навантажень пластична деформація і гістерезис у шарі компаунда практично відсутні.

Після перевірки на співвісність пари опор і зразка, до контактних майданчиків останнього припаювали виводи і проводили балансування зразка. Воно полягало в досягненні близького до нульового сигналу за відсутності механічного навантаження. Балансування здійснювали в спеціальному пристосуванні, що забезпечує вільне закріплення зразка за одну опору. До виводів живлення прикладали напругу близько 4 В, а до сигнальних – підключали мілівольтметр. Зондові виступи підпилювали алмазною пилкою в напрямку 1 або 2 (див. Рис. 2.1) до того часу, поки значення вихідної напруги за відсутності деформації не дорівнювало -0,5 ... -0,8 мВ, (полярність – протилежна полярності сигналу, що виникає при стисненні зразка). Наявність вихідної нееквіпотенціальності є необхідною для надійного закріплення ТЕП у конструкції без використання додаткових елементів шляхом попереднього піджиму, за якого вихідний сигнал звертається в нуль. Оскільки підпилювання могло спричинити за собою зниження перевантажувальної здатності, десять виготовлених ТЕП, із них вісім підпиляних, було випробувано на перевантаження. Всі зразки витримали 25 циклів навантаження до навантаження 400 МПа без помітних пошкоджень. Один із зразків було поставлено під довготривале навантаження 800 МПа, також без видимих наслідків упродовж

понад 6-ти місяців. Таким чином випробувальні тиски перевищували номінальну в 2,5...5 разів, що дозволило оцінити результати випробувань ТЕП як позитивні і практично зняти наведене побоювання.

Типові розміри готових ТЕП без опор становили $8 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$.

Крім описаних, за аналогічною технологією було виготовлено кілька ТЕП типу "Куб" (рис. 2.2) двох різних модифікацій, що розрізняються розташуванням контактних майданчиків і призначених для створення експериментальних зразків різних приладів, зокрема електронних ваг.

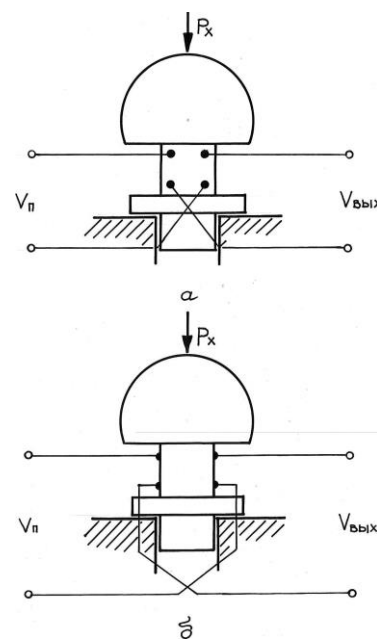


Рис.2.2 Два варіанти кубічної конструкції тензо-е.р.с.-перетворювача

2.2.1. Вибір методу створення омичних контактів

Одним із найважливіших факторів, що визначають роботу ПМВ, є якість омичних контактів, до яких пред'являють наступні вимоги:

- контакти не повинні бути випрямляючими;
- опір контакту повинен бути малим порівняно з опором перетворювача і не привносити помітну шумову компоненту у вихідний сигнал;
- контакт повинен володіти механічною міцністю, а також фізичною та хімічною стабільністю.

Є загальновизнаним, що найкращими омичними властивостями володіють сплавні контакти. Однак їхнє створення вимагає вакуумної технології і є досить трудомістким. Тому було випробувано інші методи [84,102].

Таким, що найбільш підходить, виявився метод термокомпресії [84], який і було використано при виготовленні ТЕП. До зразка, нагрітого до $710 \pm 10 \text{ К}$,

притискали тонку пластинку з контактного сплаву товщиною 30 мкм і площею близько 1 мм². Притиск здійснювали кварцевим штоком, тиск регулювали зміною навантаження на шток і підбором радіуса його торця. За термокомпресії, в результаті одночасного впливу високої температури і тиску відбувається утворення евтектики метал–напівпровідник і дифузний обмін атомами. Оскільки омичний контакт повинен мати структуру $n - n^+$ при нанесенні на матеріал n типу (аналогічно для p -типу), контактний сплав містив донорний або акцепторний домішок. Для n -кремнію він являв собою сплав золота з 0,1% сурми, для p -кремнію термокомпресію золота проводили на шар попередньо напиленого алюмінію.

Дослідження виготовлених контактів показало їхню відповідність переліченим вище вимогам. Омичний опір контактів не перевищував 1% від омичного опору зразка. Значення опору, вимірюваного між будь-якими парами контактів за протилежних полярностей прикладеної напруги до 10 В, збігалися, а струми через зразок лінійно залежали від напруги в діапазоні 0 ... 50 В у межах точності вимірювань 0,1%.

2.3. Опис методики досліджень

Для дослідження ТЕП було зібрано вимірювальну установку закритої конструкції (рис. 2.3). Вона являє собою закріплений на основі сильфон, всередині якого розміщується досліджуваний зразок. Сильфон, своєю чергою, знаходиться в порожнині, заповненій робочим середовищем (трансформаторне масло). Всередині порожнини створюють тиск за допомогою каліброваного грузопоршневого манометра. Високий ступінь точності створюваного тиску за постійно

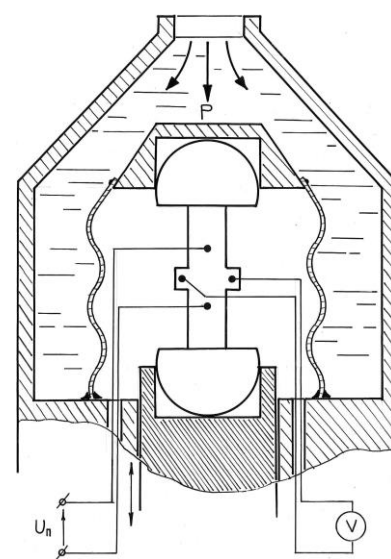


Рис. 2.3 Схема вимірювальної установки для дослідження ТЕП

заданої ефективної площі сільфона забезпечує каліброване значення одноосьового зусилля, що прикладається до зразка. Регульована нижня опора дозволяє забезпечити попередній піджим зразка, що необхідний для його кріплення в установці. Разом із цим сферичні опори ТЕП, перебуваючи в гніздах нижньої опори і сільфона, виключають прикладання до зразка будь-яких зусиль, крім поздовжнього стиснення. Всю конструкцію поміщують у термостат, що дає можливість проводити вимірювання в діапазоні 250 ... 375К.

При дослідженні ТЕП використовували наступні вимірювальні прилади: манометр вантажопоршневий зразковий – МП-60, клас точності 0,05; термостат рідинний – U10, точність підтримки температури – 0,1К, джерело живлення – Б5-47; термометр вимірювальний – ТЛ-4, ціна ділення – 0,2К; вольтметр / ометр – В7-23, клас точності – 0,05 / 0,1.

Дослідженню піддали зразки ТЕП, виготовлені з n- і р-кремнію з різною концентрацією домішок, які мають кристалографічну орієнтацію двох типів. Для всіх зразків знімали навантажувальні характеристики за кількох фіксованих температур із наведеного діапазону.

2.4. Обробка експериментальних даних

При отриманні узагальнюючих характеристик увагу приділяли параметрам, важливим для практичного використання ТЕП. До таких параметрів належать коефіцієнт перетворення механічної дії у вихідний сигнал (чутливість ТЕП), коефіцієнт нелінійності характеристики перетворення і температурна залежність чутливості. Ці характеристики визначали в наступній послідовності:

1. Приведення до стандартних умов. Зразки розрізнялися за площею поперечного перерізу, тому прикладений тиск перераховували в механічне напруження в перерізі конкретного зразка. Вихідний сигнал приводили до значень для квадратного ($l_y/l_x = 1$) зразка без урахування шунтування

(див. (1.22)), після чого його значення відносили до напруги живлення при вимірюванні.

2. Параболічна інтерполяція характеристики. Характеристику ТЕР у наведеному масштабі апроксимували виразом $E_y = AP_x^2 + BP_x$. Після

вирівнювання експериментального масиву даних коефіцієнти полінома визначали за методом найменших квадратів.

3. Обчислення коефіцієнта нелінійності. Коефіцієнт нелінійності було визначено як максимальне відносне відхилення реальної характеристики ТЕР від прямої, проведеної через точки, що відповідають нульовому і номінальному навантаженню зразка. Як номінальне навантаження приймали напругу 200 МПа в перерізі зразка.

4. Визначення характеру температурної залежності чутливості. Для перевірки відповідності температурної залежності ПА виду $\propto 1/T$

коефіцієнт В апроксимуючого полінома множили на відповідне значення абсолютної температури, після чого аналітично і графічно досліджували поведінку такого твору за зміни температури.

Алгоритм обробки експериментальних даних реалізовано на мові Бейсік. Відповідні програми для мікро-ЕОМ СМ-1800, розроблені автором, наведено в Додатку 1

2.5. Аналіз і узагальнення результатів

Всього було досліджено 45 зразків ТЕР, виготовлених із кремнію. Як контрольні було досліджено два германієвих зразки. Типову

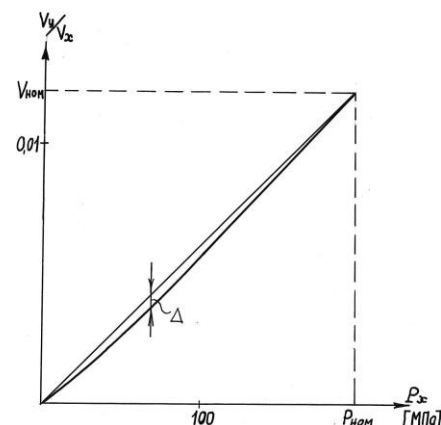


Рис.2.4 Типова характеристика ТЕР

характеристику зразка наведено на рис. 2.4. Для візуального виявлення нелінійності проведено пряму, що з'єднує початок координат із точкою, що відповідає номінальному навантаженню, і показано максимальне відхилення реальної характеристики ТЕП від цієї прямої, яке використано при розрахунку коефіцієнта нелінійності.

Параметри зразків різних груп наведено в Табл. 2.1 для температури 300К із зазначенням експериментального розкиду. Останній пов'язано з відмінністю геометричних факторів зразків у кожній групі, зумовлених їхнім індивідуальним виготовленням. Водночас використана для опису характеристик ТЕП параболічна інтерполяція з урахуванням перших двох членів розкладання [101] забезпечила добру адекватність: середньоквадратична похибка інтерполяції реальних характеристик ТЕП, визначена в процесі розрахунків, не перевищує 0,15% від значення вихідного сигналу за номінального навантаження.

Таблиця 2.1

Вихідний матеріал	Кристалічно-графічна орієнтація	Питома провідність Ом*см	Кількість зразків	Коефіцієнти апроксимуючого полінома		Коеф-т нелінійності харак-ки %
				$A \times 10^{-7}$ 1/МПа ²	$B \times 10^{-4}$ 1/МПа	
<i>n</i> -кремній	(110)	10	30	2,3 ± 0,9	3,55 ± 0,4	1,9 ± 0,4
<i>n</i> -кремній	(110)	100	5	1,9 ± 0,5	3,6 ± 0,5	1,8 ± 0,2
<i>p</i> -кремній	(110)	1	2	2,2 ± 0,7	3,4 ± 0,5	1,9 ± 0,2
<i>n</i> -кремній	(100)	10	6	3,7 ± 1,0	3,2 ± 0,5	3,1 ± 0,6
<i>p</i> -кремній	(110)	10	2	3,0 ± 0,8	3,2 ± 0,3	3,1 ± 0,3
<i>n</i> -германій	(110)	5	2	1,7 ± 0,6	3,15 ± 0,4	1,7 ± 0,2

2.5.1. Основні складові погрішності ТЕП і шляхи її мінімізації

Дослідження, мінімізація і аналіз похибок ТЕП, тобто відхилення параметрів ТЕП від характеристик ідеалізованого перетворювача, має важливе значення для практичного застосування.

Адитивну складову похибки ТЕП можна розділити на дві компоненти: квазістаціонарну і шумову. Квазістаціонарна компонента, або нульовий сигнал ТЕП – це вихідний сигнал за відсутності навантаження (на рис. 2.4 не показано). Для більшості досліджених зразків нульовий сигнал, будучи встановленим у процесі виготовлення ТЕП у межах 0,5 ... 1% від номінального значення вихідного сигналу, змінюється в діапазоні 270 ... 375K на величину не більше 0,2% від номіналу. Це значення, властиве вільним зразкам, зростало до 1% за монтажу останніх у вимірювальній установці. Зміна нульового сигналу з температурою пов'язана, в першу чергу, зі зміною ступеня електричної асиметрії зразка. Балансування зразка, описане в розділі 2.2, дозволяє досягти абсолютної електричної симетрії лише за фіксованого значення температури. Підвищення ступеня електричної симетрії зразка і зниження дрейфу вихідного сигналу за безумовного виконання умов геометричної симетрії є можливим за рахунок удосконалення технології виготовлення ТЕП. Ймовірним джерелом температурного дрейфу нульового сигналу в геометрично симетричному зразку можуть служити також циркуляційні струми, що виникають у напівпровіднику, який має шарувату неоднорідність легування, якщо напрямок шарів становить некратний кут 45° із віссю ТЕП. Шумова компонента загалом викликається контактними явищами і для досліджених зразків не перевищувала 5×10^{-6} від значення номінального сигналу. Для ТЕП типу "Куб" шумова компонента досягала 5×10^{-5} , вочевидь, внаслідок недосконалості технології виготовлення протяжних контактних майданчиків.

Мультиплікативна складова похибки ТЕП визначає зміну значення ПА з температурою. При створенні приладів, що працюють у широкому температурному діапазоні, виникає завдання компенсації зміни чутливості первинного перетворювача з температурою. Таку компенсацію зазвичай проводять у вторинному перетворювачі і яка є принципово можливою, якщо вдається практично реалізувати компенсуючий вузол з функцією передачі, зворотною тій, якою описують температурну залежність чутливості первинного перетворювача. Таким чином, якщо чутливість ТЕП у всьому діапазоні робочих температур описують залежністю $\propto 1/T$, то, змінюючи напруження живлення ТЕП за законом $\propto T$, що легко реалізувати на практиці, можна виключити температурну залежність чутливості за умови, що вихідний сигнал ТЕП за фіксованої деформації лінійно залежить від напруги живлення. Відзначимо, що ця умова виконується за відсутності розігріву ТЕП струмом, що його живить.

Остання відмінність характеристики реального ТЕП від характеристики ідеального перетворювача – це її нелінійність, яка є негативним фактором за практичного застосування. Часткову або повну компенсацію нелінійності у вторинному перетворювачі можна здійснювати в діапазоні робочих температур, якщо ступінь відносної нелінійності характеристики ТЕП не залежить чи слабо залежить від температури.

2.5.2. Параметри характеристики перетворення

Параметри, наведені в Табл. 2.1, мають такий фізичний сенс. Параметр визначає початкову чутливість ТЕП. За змістом він близький до відношення u_{xy}/u_{yy} з [15]. Оскільки ЕТЕ, як зазначено в розділі 1, не є розмірним ефектом, ТЕП допускає довільне незалежне масштабування за допомогою будь-якого

одного з трьох вимірів. При цьому, якщо відношення l_y/l_x не перевищує 0,5,

початкова чутливість ТЕП по силі визначається виразом:

$$\frac{E_y}{E_x} = \frac{Bl_y}{Sl_x} [H^{-1}], \quad (2.1)$$

де S – поперечний перетин ТЕП, m^2 .

Отримані значення параметра B поступаються на 10 ... 15% визначеним у [15] значенням u_{xy}/u_{yy} , що пов'язано з ігноруванням ефекту шунтування при розрахунках. З огляду на це збіг може бути визнано задовільним.

Коефіцієнт A , визначаючи параболічну компоненту характеристики перетворення, побічно характеризує ступінь нелінійності останньої. Більш зручним для практичного використання є коефіцієнт нелінійності характеристики, визначений у розділі 2.4. Слід, однак, відзначити, що коефіцієнт нелінійності, який визначається таким чином, залежить від протяжності ділянки характеристики, для якого він визначений, і що його значення є тим нижчим для конкретного ТЕП, чим вузьчим є номінальний діапазон навантажень.

Порівняння параметрів ТЕП, виготовлених із кремнію n- і р-типу, виявляє, що за приблизно однакової чутливості, в 1,6 рази вищим є коефіцієнт нелінійності характеристики останнього, що визначило вибір електронного кремнію як вихідного матеріалу для виготовлення ТЕП. Та ж обставина, встановлена на початковому етапі дослідження ТЕП, зумовила більш широке дослідження ТЕП із кремнію n-типу.

Із n-кремнію були виготовлені ТЕП двох типів – тип (100) і тип (110). Умовні найменування типів ТЕП обрано за відповідною кристалографічною площиною, паралельною лицьовій грані ТЕП. Чутливість ТЕП типу (100) виявилася трохи нижчою (теоретична різниця чутливості відповідно до (1.11) і

(1.12) становить 12%), а коефіцієнт нелінійності характеристики – в 1,5 рази вищий, ніж у ТЕП типу (110). На цій підставі перевагу у практичному використанні надано ТЕП типу (110).

Коефіцієнт нелінійності характеристики досліджених ТЕП виявив тенденцію до спаду в середньому на 20% за зростання температури на 100К. Водночас зустрічалися зразки з незалежним від температури коефіцієнтом нелінійності і навіть такі, коефіцієнт нелінійності яких зростав на 10% у тому самому діапазоні температур.

Різний ступінь нелінійності характеристики ТЕП різних типів є результатом залежності вихідного сигналу від низки параметрів, які не обліковані в розрахунках, виконаних у лінійному наближенні за компонентами тензора механічної напруги [101]. Як впливає з [133], нелінійна поведінка актуальних для кремнію компонент тензора еластоопору m_{11} і m_{12} , пов'язаних зі зміною заповнення носіями долин зони провідності за одноосьового стискання кристалу, ускладнюється підключенням аналогічних членів, що описують міждолинне розсіювання. Останні експоненціально зростають за підвищення температури з показником T/θ , де θ – температура міждолинного фонона в кремнії (700К).

Оскільки компоненти тензора \hat{m} входять у вираз для ПА з множниками, що містять напрямляючі косинуси кута вирізки, можна припустити, що для ТЕП різних типів члени, що містять компоненти тензора \hat{m} , даватимуть більший або менший внесок у результуючий вираз для ПА, визначаючи тим самим різницю в коефіцієнтах нелінійності для зразків різних типів за підвищених температур. Як і очікувалося, чутливість і

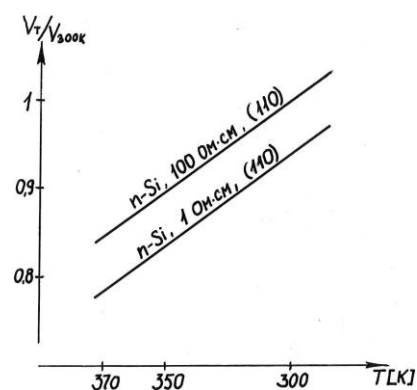


Рис. 2.5 Температурна залежність чутливості ТЕП

коефіцієнт нелінійності ТЕП, виготовлених із кремнію різних ступенів легування, несуттєво розрізняються для матеріалу з питомим опором у межах 1 ... 100 Ом. см (за $T = 300\text{K}$), тому при виборі того чи іншого вихідного матеріалу визначальними можуть стати вимоги певних значень вхідного і вихідного імпедансів перетворювача.

Аналіз температурних залежностей параметрів ТЕП (рис. 2.5 і рис. 2.6) виявив хороший збіг реальної залежності ПА від температури в порівнянні з теорією. Так, для зразків із кремнію n-типу залежність пропорційного ПА параметра від температури описують виразом $\propto T^\alpha$, де $\alpha = -0,92 \pm 0,04$ в діапазоні 250...375K. При цьому не було виявлено кореляції між характером температурної залежності чутливості і такими характеристиками ТЕП, як ступінь співосьовості зразків і опор, коефіцієнт нелінійності характеристики, зміна адитивної складової вихідного сигналу і коефіцієнта нелінійності з температурою.

Шумова компонента близько 0,5 мкВ за значення номінального сигналу 100 мВ визначає, що за десятикратного відношення *сигнал / шум* поріг чутливості виготовлених ТЕП складає 5 мкВ. Таким чином, з урахуванням запасу з вимірюваної напруги динамічний діапазон ТЕП в описаній вимірювальній установці складає близько 95 дБ.

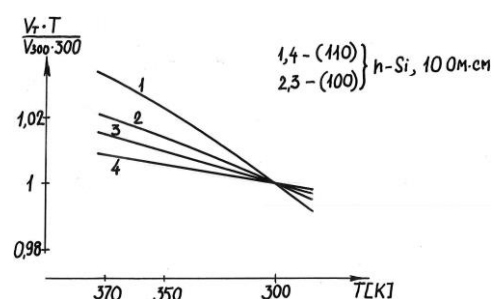


Рис. 2.6 Температурна залежність твору відносної чутливості назначення абсолютної температури для різних ТЕП

Слід зазначити, що ТЕП типу (100) можуть виявитися кращими при виготовленні перетворювачів зі злитка, вирощеного в напрямку $\langle 100 \rangle$. У цьому випадку шарувата неоднорідність злитка, яка, як правило, має місце в матеріалі, що промислово виготовляється, будучи спрямованою вздовж осі зразка,

принципово не вноситиме у вихідний сигнал адитивні складові за рахунок додаткових ефектів. Крім цього, при розрізанні такого злитка на окремі зразки з геометричних міркувань відсоток відходів кремнію буде значно нижчим, ніж при вирізанні зразків типу (110) зі зливка, вирощеного в напрямку $\langle 111 \rangle$.

2.6. Переваги тензо-е.р.с.-перетворювачів

Проведені дослідження практично підтвердили низку переваг ТЕП, очевидних за теоретичного розгляду ефекту тензо-е.р.с.

Будучи функціональним аналогом тензорезисторного моста, ТЕП забезпечує безпосереднє перетворення механічного зусилля в близький до пропорційного електричний сигнал без застосування додаткових схемних елементів. Як генератор напруги ТЕП відрізняється зниженою критичністю до погіршень, внесеним за рахунок недосконалості контактів.

Безрозмірний характер ЕТЕ допускає масштабування ТЕП, тобто виготовлення сімейства перетворювачів для ряду значень номінального тиску.

Якщо ТЕП виконаний з однорідного за питомим опором напівпровідника з високим ступенем геометричної симетрії, то адитивна складова вихідного сигналу, викликана "розбалансом" еквівалентного ТЕП моста може становити 0,2% і менше від значення номінального сигналу в діапазоні температур 250–375К. Досягнення аналогічного результату в тензорезисторних мостах є складною проблемою, яка потребує вирішення низки завдань [86,98].

Конструктивне виконання ТЕП дозволяє виключити пружні елементи конструкції приладу і безпосередньо використовувати ТЕП у режимі одноосового стиску, яке забезпечено застосуванням напівсферичних опор що самоцентруються. При цьому необхідно забезпечити радіальну стійкість ТЕП у конструкції. Цю вимогу виконати значно легше в ТЕП типу "Куб". Таким чином

знімається проблема з'єднання пружного і перетворювального елементів, необхідність у клеях і пов'язаних із ними додатковими складовими похибки перетворювачів.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

1. Володіючи значно зниженими, в порівнянні з тензорезисторним мостом, значеннями адитивної складової похибки вихідного сигналу та її температурного дрейфу, тензо-е.р.с.-перетворювач є перспективним датчиком для створення приладів, що працюють у широкому діапазоні температур.

2. За механічних напруг у межах 0 ... 200 МПа чутливість реальних ТЕП описують залежністю $E_y = AP_x^2 + BP_x$ із похибкою не гірше 0,15%, де параметри А і В залежать від вихідного матеріалу, його питомої провідності та кристалографічної орієнтації зразка.

3. Мінімальне значення коефіцієнта нелінійності характеристики $\simeq 1,8\%$ досягається в ТЕП типу (110), виготовлених із кремнію n-типу з питомим опором 1 ... 100 Ом см (концентрація донорів – $4 \cdot 10^{19} \dots 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$). Для такого матеріалу параметр анізотропії, що визначає чутливість ТЕП у діапазоні 250 ... 375К, залежить від температури дещо слабше, ніж передбачає теоретична оцінка. Реальну залежність чутливості описано законом $\propto T^\alpha$, де $\alpha = -0,92 \pm 0,04$.

5. Запропонована конструкція ТЕП, що виключає низку механічних елементів і елементів закладення, дозволяє додатково підвищити точність перетворення, що в поєднанні з можливістю масштабування ТЕП створює передумови для створення низки надійних перетворювачів для вимірювання зусиль і тисків у широкому діапазоні значень.

Розділ 3. НОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПОПЕРЕЧНІ КОНЦЕНТРАЦІЙНІ ЕФЕКТИ

Цей розділ присвячено експериментальному дослідженню поперечних концентраційних ефектів у германії та їхній взаємодії з ефектами інших класів із точки зору використання в перетворювачах механічних величин. До причин, що зумовили вибір германію для досліджень, можна віднести порівняно велику довжину дифузійного зсуву в слабо легovanому матеріалі і високе значення біполярного ПА за деформації. Практичний інтерес до перетворювачів, в яких використовують концентраційні ефекти, викликано їхньою високою чутливістю. Специфічною особливістю пропонованих перетворювачів є істотна залежність їхніх параметрів від стану поверхні, що вимагає спеціальних заходів щодо захисту останньої.

3.1 Диференціальний тензотранзистор

Диференціальний тензотранзистор (ДТТ) являє собою перетворювач тиску, принцип дії якого засновано на взаємодії електричного пінча і транзисторного ефекту. Конструкція ДТТ, будучи принциповим аналогом магнітотранзистора [27], забезпечує йому низку переваг у порівнянні з іншими перетворювачами, що використовують ефект ЕП, при збереженні переваг останніх. Це, зокрема, нульовий вихідний сигнал за відсутності тиску і широкий діапазон тисків, в якому зберігається лінійна залежність вихідного сигналу [46].

3.1.1 Конструкція і виготовлення ДТТ

Схематичне зображення ДТТ наведено на рис. 3.1. Він являє собою пластинку домішкового германію, вирізану у кристалографічному напрямку, який збігається з вирізкою інших ЕП-датчиків (рис. 2.2). На одній з широких граней (тут – верхньої)

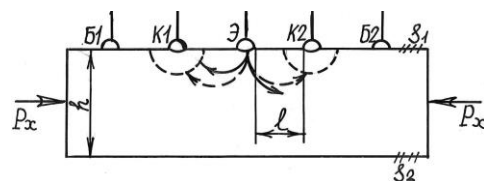


Рис. 3.1 Конструкція диференціального тензотранзистора

розташовані три р-п-переходи і два омічні контакти, причому обидва омічні контакти знаходяться по краях зразка. Відстані між р-п-переходами орієнтовно дорівнюють довжині дифузійного зміщення в цьому матеріалі. При цьому р-п-перехід, розташований в центрі, служить емітером, два крайніх – колекторами, а омічні контакти – виводами бази.

Дослідний зразок ДТТ було виготовлено з п-германію з питомим опором $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Платівку було вирізано відповідно до описаної орієнтації і вона мала розміри $12 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$. Відстань між колекторами і емітером дорівнювала близько 1 мм (довжина дифузійного зсуву того ж розміру). Р-п-переходи виготовлені вплавленням індію для колекторних переходів та індію з додаванням 5% галію – для емітерного. Омічні контакти виготовляли шляхом вплавлення олова. Після вплавлення і припайки провідників ДТТ травили в розчині пергідролу для зниження швидкості поверхневої рекомбінації.

3.1.2 Принцип дії ДТТ

Структура, яку зображено на рис. 3.1, є диференціальним транзистором із керованим коефіцієнтом переносу носіїв. Управління відбувається при ЕП у базі, викликаному деформацією. За відсутності зовнішньої сили провідність пластинки (базі) є ізотропною. За подачі напруг живлення відповідної полярності (пряме зміщення на емітерний перехід і зворотне на колекторних) у ланцюгах колекторів встановлюються струми, які за абсолютної електричної та геометричної симетрії приладу щодо вертикальної осі є однаковими за величиною. При додаванні зовнішньої сили в платівці виникає наведена анізотропія, що призводить до появи додаткових поперечних компонент струму. Напрямок поперечних компонент визначається взаємною орієнтацією напрямків деформації і вихідних струмів. Оскільки напрямки струмів від емітера до кожного з колекторів є протилежними, неосновні носії виносяться до верхньої межі в одній половині ДТТ і до нижньої – в іншій. При цьому число носіїв, що

потрапляють в область просторового заряду кожного колектора, стає різним і, як наслідок цього, струми колекторів змінюються. Струм колектора, розташованого в тій половині ДТТ, в якій носії виносяться до верхньої межі, зростає, а в іншій – зменшується. При включенні ДТТ у схему за рис. 3.2 на вихідних клеммах виникає різниця потенціалів, що є мірою деформації.

3.1.3. Аналіз результатів випробувань ДТТ

Експериментальний зразок ДТТ випробовували в давильної установці. За струму емітера 5 мА і при напрузі $u_{кб} = 5,5$ В

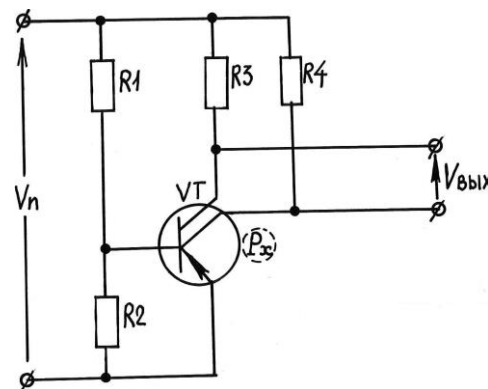


Рис. 3.2 Схема включення ДТТ

вихідна напруга в схемі за рис. 3.2 дорівнювала 0,2 В за механічної напруги в перерізі ДТТ 50 МПа. Максимальна вихідна напруга склала 1,5 В для напруги 400 МПа. Чутливість ДТТ до тиску вельми слабо залежить від струму емітера. Так, за зміни струму (від 1 до 10 ма) чутливість зростає на 10%. Оскільки площі емітерного і колекторних переходів в експериментальному зразку ДТТ орієнтовно однакові, ефективність ДТТ, як власне транзистора, є вельми малою через малий коефіцієнт переносу. Коефіцієнт посилення ДТТ, який визначено як $\Delta I_K / \Delta I_E$, приблизно дорівнює одиниці.

За різкого збільшення швидкості поверхневої рекомбінації на нижній межі після шліфування останньої чутливість ДТТ зростає за рахунок рекомбінації на ній неосновних носіїв у 5 разів і досягає близько 0,02 В / МПа.

Діапазон тисків, в якому зберігається пряма пропорційна залежність між зусиллям і вихідним сигналом у межах точності вимірювань 0,5%, становить 0 ... 150 МПа для обох варіантів ДТТ (рис. 3.3). Рівень шумів ДТТ десь 10^{-5} В визначає відношення номінального сигналу до шуму близько 100 дБ.

Висока чутливість параметрів ДТТ до швидкості поверхневої рекомбінації зумовлює потребу стабілізації властивостей поверхні і її захисту. Для цього грані виготовленого перетворювача можуть покривати лаками КО-961П або М-10. Більш досконалим методом захисту є нанесення шару двоокису кремнія. Крім цього, розмірний характер ефекту ЕП, який в зазначеному приладі є основним діючим ефектом, накладає обмеження на розміри ДТТ і діапазон перетворення. Останнє обмеження можна істотно послабити при виготовленні плівкового ДТТ на відповідній підкладці (наприклад, з арсеніду галію).

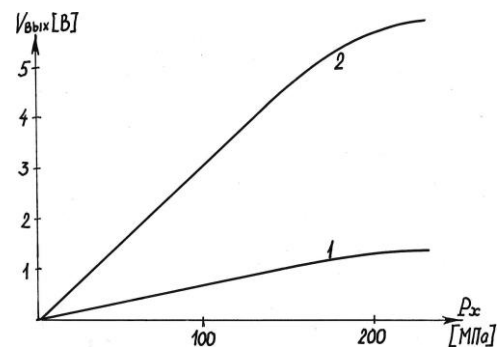


Рис. 3.3 Характеристика перетворення ДТТ
1 – $S_1=S_2=10^2$; 2 – $S_1=10^2$, $S_2=10^4$ [см/с]

Зазначені особливості ДТТ притаманні всім перетворювачам, описаним у цьому розділі. Зокрема, ігнорування вимог щодо захисту поверхні в описаних приладах призводить до зростання шумової компоненти сигналу і посилення тимчасового дрейфу характеристик перетворювачів.

3.2. Перетворювач переміщення на основі магнітоконцентраційного ефекту

3.2.1. Конструкція і принцип дії перетворювача

Як зазначалося в розділі 1, при МКЕ, поряд із локальними змінами концентрації носіїв струму, відбувається зміна і повного числа їх у зразку в сторону як зменшення, так і збільшення [146]. Останній ефект особливо посилюється, якщо швидкості поверхневої рекомбінації на широких гранях зразка істотно розрізняються. В цьому випадку, в силу того, що винос носіїв при МКЕ визначається взаємною орієнтацією електричного і магнітного полів і спрямований до однієї з протилежних широких граней, повна провідність

пластини різняться для протилежних напрямків електричного поля. Іншими словами, в магнітному полі такий зразок володіє випрямляючою характеристикою.

Крім можливості використання МКЕ у високочутливих перетворювачах магнітних величин [74], інтерес становить створення перетворювача малих статичних переміщень із високою роздільною здатністю на основі цього ефекту. У цьому випадку зразок використовують як позиційно чутливий елемент, вихідний сигнал якого залежить від його положення щодо магнітної системи.

У роботах [49,74] вперше було розглянуто перетворювач переміщення на основі МКЕ. Однак авторам цих робіт вдалося отримати лінійну залежність вихідного сигналу у відносно вузькому діапазоні переміщень. Причиною цього було те, що чутливий елемент розташовували поза зазором магнітної системи. Ця ж обставина не дозволила повною мірою реалізувати потенційну чутливість перетворювача.

Нижче запропоновано конструкцію перетворювача переміщення на основі МКЕ зі значно розширеним діапазоном лінійного перетворення і водночас із підвищеною чутливістю (рис. 3.4) [17,18]. Принцип дії перетворювача переміщень засновано на зміні вольт-амперної характеристики (ВАХ) чутливого елемента при

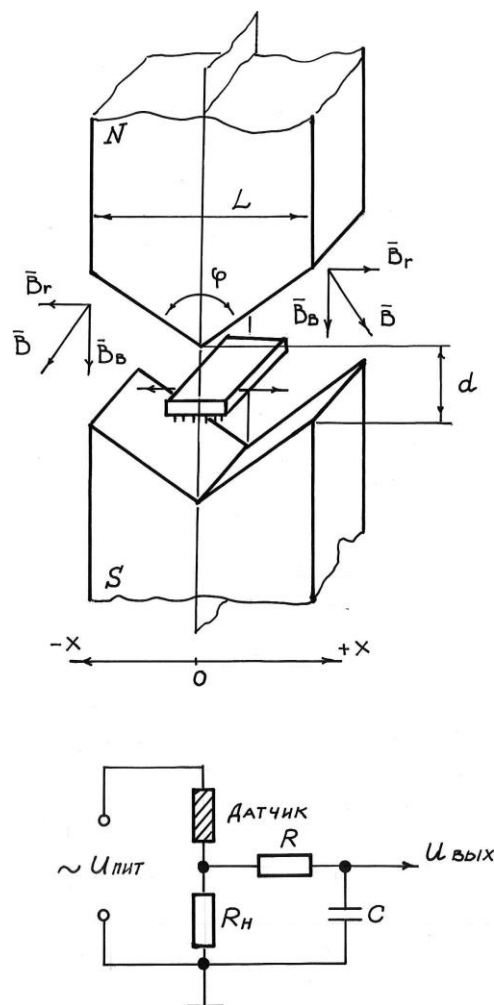


Рис. 3.4 Перетворювач переміщення на основі магнітоконцентраційного ефекта і схема включення чутливого елемента

переміщенні його в зазорі магнітної системи. Створюване за допомогою зовнішнього джерела магнітне поле розподіляється в робочому зазорі відповідним чином за допомогою магнітних концентраторів. Застосування концентраторів з V- і М-подібними профілями призводить до того, що значення горизонтальної компоненти вектора магнітної індукції \vec{B}_r , яка викликає МКЕ, монотонно змінюється від максимальної позитивної до протилежної негативної величини на краях зазору, перетворюючись у нуль у площині симетрії магнітної системи. Ця зміна тягне за собою монотонну зміну форми ВАХ зразка, при цьому в площині симетрії магнітної системи ВАХ є лінійною, а для двох положень зразка, рівновіддалених від площини симетрії по різні її сторони, ВАХ є дзеркальною щодо початку координат. При живленні зразка змінною напругою зміщення його відносно щільності симетрії системи викликає появу постійної складової струму, величина і знак якої є функцією координати. Постійна компонента напруги, знятої зі струмовимірювального резистора, включеного послідовно зі зразком, виділяється фільтром низьких частот.

3.2.2. Результати дослідження експериментального зразка перетворювача

Було виготовлено і досліджено дослідний зразок перетворювача з наступною геометрією магнітної системи: $L = 10$ мм, $\varphi = 90^\circ$, $d = 1,5$ мм. Зразок у формі прямокутного паралелепіпеда було виготовлено з р-германію із залишковою концентрацією акцепторів $N_a - N_d = 1,2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ і дифузійною довжиною $l \simeq 2,1$ мм. Мінімальну швидкість поверхневої рекомбінації на одній грані $S_{min} \simeq 1 \text{ м/сек}$ було досягнуто шляхом травлення зразка в пергідролі, а максимальну на протилежній $S_{max} \simeq 100 \text{ м/сек}$ – механічною обробкою. Розміри зразка – $10 \times 2,5 \times 0,5 \text{ мм}^3$.

Зразок живився змінною напругою 24 В, 50 Гц. Вибір частоти напруги живлення в діапазоні до 1 КГц не є критичним і не змінює основних параметрів перетворювача. Вольткоординатну характеристику перетворювача, виміряну на виході фільтра низьких частот, наведено на рис. 3.5.

Діапазон лінійної залежності вихідного сигналу для експериментального зразка перетворювача склав 3,4 мм, що значно перевищує відповідний параметр датчика, описаного в [49], чутливість перетворювача склала 3,5 мВ / мкм, що також дещо перевищує результат, досягнутий в згаданих роботах. Шумовий компонент близько 2 мВ визначає роздільну здатність перетворювача, яка становить близько 5 мкм при відношенні сигнал / шум, що дорівнює 20 дБ. Зміну знака вихідного сигналу в момент перетину зразком площини магнітної системи може бути використано для створення на основі МКЕ-перетворювача безконтактного датчика нейтрального положення.

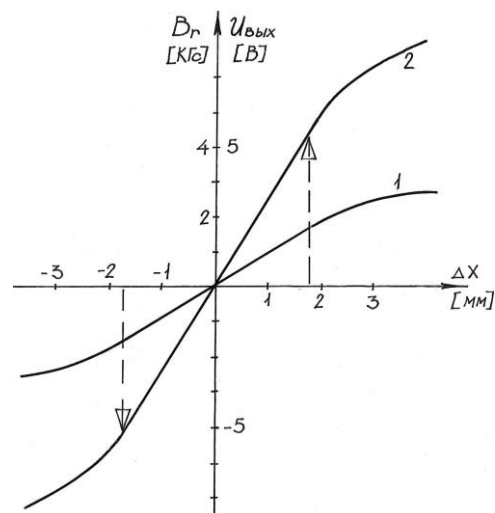


Рис. 3.5 Координатна залежність горизонтальної компоненти вектору магнітної індукції /1/.

Вихідна характеристика перетворювача лінійного переміщення /2/.

Стрілками відмічені межі лінійності характеристики.

3.3. Перетворювачі на основі осцилаторного ефекту

Осцилаторний ефект являє собою появу періодичних змін струму в обмеженій пластині з біполярного напівпровідника, що виникає внаслідок гвинтової нестійкості електронно-діркової плазми в напівпровідниках, поміщених у поздовжні електричне та магнітне поля [28–31,33–35,68,134]. За різних зовнішніх впливів ефект виявляє значну варіабельність [32,124]. Цю властивість осцилатора використано при розробці чутливих перетворювачів тиску, температури і вологості [95]. У цьому розділі запропоновано порогові перетворювачі сили і кута повороту, засновані на тому, що умовою порушення

осциляторних коливань є високий ступінь електричної ізоотропії зразка в площині його поперечного перерізу, перпендикулярної напрямку тягнучого поля. При порушенні цієї умови в зразку виникають концентраційні ефекти, які перешкоджають розвитку осциляторного ефекту, що призводить до зриву коливань [32,134]. Поява наведеної анізотропії рухомостей носіїв заряду в розглянутих перетворювачах є специфічною для багатодолинних напівпровідників і характеризується явно вираженою орієнтаційною анізотропією.

3.3.1 Підготовка зразків і методика експерименту

Експерименти з дослідження експериментальних зразків перетворювачів механічних величин на основі осциляторного ефекту проводили за кімнатної температури на зразках германію із залишковою концентрацією домішок

$N_d - N_a = 1,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Зразки мали форму прямокутних паралелепіпедів за розмірами $l_x = 13 \text{ мм}$, $l_y = l_z = 2l = 1,5 \text{ мм}$. Один зі струмових контактів на торцевих гранях був слабо інжектуючим, а другий – омічним. Перед вимірами зразки травили в перекису водню, після цього швидкість поверхневої рекомбінації на всіх бічних гранях була практично однаковою і близькою до 3 м / с . По відношенню до кута вирізки досліджені експериментальні зразки ділили на дві групи: зразки першої групи мали одну бічну грань, повернену щодо площини (010) навколо осі

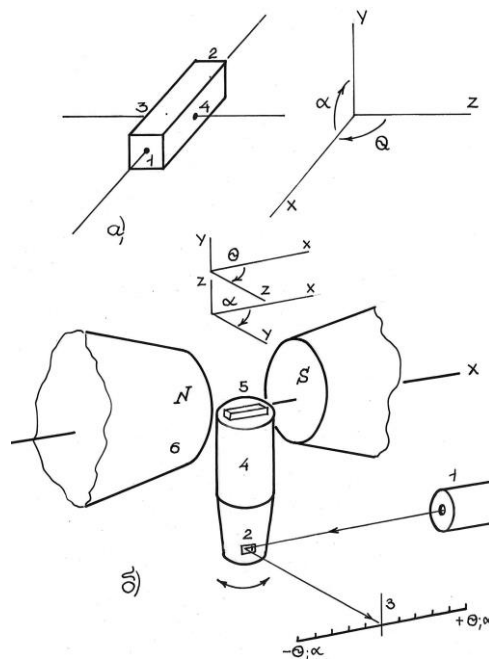


Рис 3.6 Схема установки для дослідження перетворювача на основі осциляторного ефекту (облаштування одновісного стискування не показано)
а) форма зразка
б) оптична система реєстрації кута повороту.
1 - лазер ЛГ- 78, 2 - дзеркало,
3 - вимірювальна шкала,
4 - утримувач, що обертається,
5 - досліджуваний зразок,
6 -концентратори електромагніту.

[100] на $22,5^\circ$ (див. Рис.1.1), для зразків другої, контрольної групи, цей кут дорівнював 45° .

Живлення зразків здійснювали одиночними прямокутними імпульсами напруги амплітудою до 80 В і тривалістю близько 1 мс. При дослідженні експериментального зразка перетворювача кута повороту зразки поміщали між полюсами електромагніту на майданчику спеціального тримача, який міг повертатися навколо осі, нормальної до напрямку магнітного поля, при цьому кут повороту фіксувався оптичною системою (рис. 3.6). Така конструкція утримувача дозволяла вивчати амплітудні характеристики коливань у залежності від кута неузгодженості θ між напрямками електричного і магнітного поля в площині xz . На практиці зазначена неузгодженість задавалася кутом повороту тримача, причому його несучий майданчик залишався паралельним до граней xz зразка.

При дослідженні експериментального зразка порогового перетворювача сили було передбачено одноосьове стискання зразків у напрямку за допомогою спеціального пристрою, розташованого між полюсами електромагніту. Таким чином вивчали вплив одноосьової деформації на основні характеристики осцилістора за строгої паралельності векторів \vec{E} і \vec{H} .

3.3.2. Експериментальні результати

При відхиленні зразка, в якому існують осцилісторні коливання, від положення, яке відповідає колінеарності електричного і магнітного полів на деякий кут, спостерігається зрив коливань. При цьому області існування коливань для зразків першої групи виявляються асиметричними щодо вихідного положення ($\vec{H} \parallel \vec{E}$) і симетричними

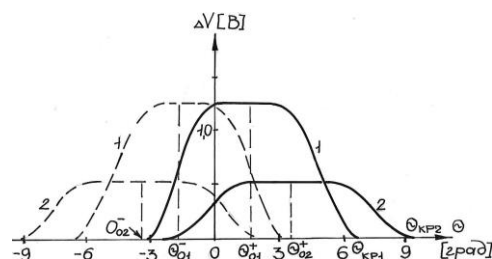


Рис.3.7 Залежність амплітуди коливань різниці потенціалів на бічних зондах від кута розузгодження для зразка першої групи

для зразків іншої. Для кількісної оцінки цієї асиметрії введено поняття про квазінейтральне положення зразка, тобто про такий стан, відхилення від якого в протилежні сторони призводить до симетричного зриву осциляторних коливань. Квазінейтральне положення характеризується кутом неузгодженості θ_0 . За такого визначення зразків другої групи завжди $\theta_0 = 0$. Для зразків першої групи θ_0 і його знак залежать від знака H . у відповідності зі знаком H вводять величини θ_0^+ і θ_0^- , причому, як підказує досвід, $\theta_0^+ = -\theta_0^-$.

На рис. 3.7 наведено типові залежності амплітуди коливань різниці потенціалів на бічних зондах ΔV від θ для одного зі зразків першої групи. Залежності 1 отримані за $E_x = 34$ В/см і $H = \pm 4$ КЕ, 2 – за $E_x = 17$ В/см і $H = \pm 8$ КЕ, суцільні криві відповідають $Hx > 0$, штрихові – $Hx < 0$. Видно, що кутова асиметрія зриву коливань за відхилення зразка в протилежні сторони виростає з ростом H . Так, із залежностей 2 слідує, що у випадку $Hx > 0$ область існування коливань обмежена кутами $\theta = -2^\circ \dots 9^\circ$, а у випадку $Hx < 0$ – $\theta = -9^\circ \dots 2^\circ$. Таким чином, нейтральним положенням зразка відповідають кути $\theta_{02}^\pm = 3,5^\circ$. Із залежностей 1, відповідно, слідує $\theta_{01}^\pm = 1,8^\circ$.

Результати досліджень перетворювача сили, тобто залежність амплітуди коливань від деформуючого зусилля для зразка першої групи наведено на рис. 3.8. Ці залежності отримано для того ж зразка і за тих самих значень полів $\vec{E} \parallel \vec{H} \parallel ox$, що й залежності на рис. 3.7. За деформації зразків другої (контрольної) групи зриву коливань не спостерігалось.

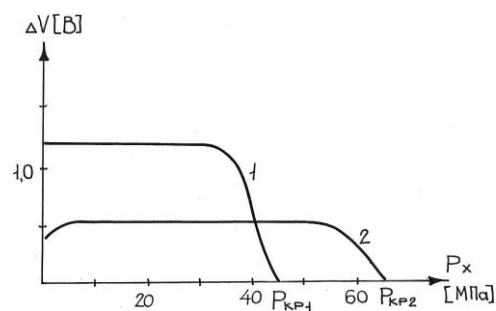


Рис. 3.8 Залежність амплітуди коливань різниці потенціалів на бічних зондах від деформуючого зусилля для зразка першої групи

3.3.3. Аналіз результатів

Аналіз кутових залежностей областей існування осцилісторного ефекту і зіставлення результатів для зразків, які відносять до різних груп кристалографічної орієнтації, дає підставу стверджувати, що в зразках першої групи існування коливань визначається одночасним проявом двох концентраційних ефектів – звичайного МКЕ і багатодолинного, парного по H , МКЕ (БМКЕ) [103]. Квазінейтральності положення зразка відповідають взаємній компенсації МКЕ і БМКЕ (ПА дорівнює нулю). У дослідях із перетворювачем сили поряд із БМКЕ в зразках першої групи виникає ЕП, причому поперечні потоки пар носіїв, зумовлені БМКЕ і ЕП, спрямовані назустріч один одному, тому за деякого значення одноосьового стиску результуючий ПА також перетворюється в нуль [8]. За подальшого збільшення стиснення загальний поперечний потік носіїв змінює напрямок, що, в кінцевому рахунку, призводить до зриву коливань.

Виявлену орієнтаційну анізотропію характеристик осцилісторного ефекту використано в безконтактному пороговому перетворювачі кута повороту. За різної кристалографічної орієнтації зразка отримано порогові перетворювачі як із симетричною, так і з асиметричною характеристиками, причому величиною асиметрії можна управляти, змінюючи напруженість магнітного поля. При цьому, звичайно, має бути виконаною умова збудження коливань $E_x H_x \geq (EH)_{кр}$.

Використання результатів проведених досліджень дозволило створити також пороговий датчик сили з порогом, керованим напруженістю магнітного поля [100]. Протяжність схилу характеристики такого перетворювача становить менше 10% від значення порогового зусилля. В описаних дослідях поріг спрацьовування перетворювача сили змінювався в межах 20 ... 60 МПа, приведених до перетину зразка, за зміни напруженості магнітного поля 8...2,5 КГс.

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

1. На основі ефекту ЕП запропоновано конструкцію диференціального тензотранзистора з діапазоном лінійного перетворення до 150 МПа і вихідним сигналом близько 5 В за динамічного діапазону 80 дБ.
2. Використання оптимізованої конфігурації магнітної системи дозволило розробити МКЕ-перетворювач переміщення з діапазоном лінійного перетворення, що досягає 3,4 мм за роздільної здатності близько 5 мкм.
3. На основі взаємодії осцилаторного і МК-ефектів розроблено порогові перетворювачі кута повороту як із симетричною, так і з асиметричною характеристиками перетворення, значення порогових кутів і величину асиметрії яких можна змінювати, змінюючи кристалографічну орієнтацію зразка і значення магнітного поля. Кутова роздільна здатність пропонує перетворювачів становить $0,5^\circ$.
4. Запропоновано пороговий датчик сили з порогом, керованим магнітним полем з використанням осцилаторного ефекту і ефекту ЕП. Чутливість датчика складає 10% від значення порогу.
5. Перетворювачі на основі концентраційних ефектів у германії характеризують високими значеннями чутливості: номінальний вихідний сигнал досягає кількох вольт. Недоліком перетворювачів є їхня критичність до швидкості поверхневої рекомбінації, що вимагає для германію спеціальних заходів щодо захисту поверхні і дещо звужує динамічний діапазон. Область застосування запропонованих перетворювачів – прості вимірювальні системи, основною вимогою до яких є високий рівень вихідного сигналу первинного перетворювача.

Розділ 4. ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ТЕНЗО-Е.Р.С.

4.1. Постановка завдання

Як зазначалося у вступі, масовий випуск дешевих перетворювачів середнього класу точності для загальнопромислових застосувань є можливим винятково на базі сучасної напівпровідникової мікроелектронної технології – МЕМС. При цьому завдання отримання високого рівня вихідного сигналу для ІПТ більше не є домінуючим у зв'язку з наявністю дешевих і надійних інтегральних підсилювачів. На перший план при масових застосуваннях ІПТ виходять питання забезпечення широкого динамічного діапазону, високої надійності, терміну служби і стабільності характеристик перетворення як у часі, так і в партії від датчика до датчика.

У результаті функціональної інтеграції, характерної для МЕМС-перетворювачів, традиційний поділ приладу на вузли втрачає сенс. Проте для опису функціональних областей ІПТ буде використано терміни «чутливий елемент» (ЧЕ), «пружний елемент» (), «первинний і вторинний перетворювачі» з розумінням їхньої умовності.

Неідеальність ІПТ полягає, як і у випадку дискретних перетворювачів, у наступних проявах:

- зміна чутливості ІПТ із температурою – мультиплікативна компонента;
- температурний і часовий дрейф нульового сигналу ІПТ – адитивна квазістаціонарна компонента;
- шумова складова вихідного сигналу – адитивна нестаціонарна компонента;
- нелінійність характеристики ІПТ.

Найбільш актуальною для зниження наведеної похибки є завдання мінімізації другої з перелічених складових, оскільки інші три в різних додатках можуть бути некритичними або бути відносно легко компенсованими у вторинному перетворювачі. Більшість опитаних і промислових зразків ІПТ, розроблених в Україні та за кордоном, характеризуються значним дрейфом нульового сигналу, що досягає 10 ... 30% від значення номінального сигналу в діапазоні температур $-40 \dots +120^\circ \text{C}$ [6,7,22,90]. Мінімізація адитивної складової вихідного сигналу та її залежності від дестабілізуючих факторів, будучи проблемою в дискретних перетворювачах, посилюється в ІПД широкого застосування з двох причин. По-перше, функціональна інтеграція і скорочення розмірів ІПТ призводить до підвищення взаємних залежностей і впливу елементів (областей) ІПТ. Другою причиною є тенденція зведення до мінімуму індивідуальних операцій при виготовленні і налаштуванні ІПТ і, в ідеалі, вилучення останніх. З іншого боку, групові методи виготовлення ІПТ дають розробнику унікальну можливість уніфікації та узгодження параметрів елементів і окремих перетворювачів у партії.

Зниженню адитивної складової вихідного сигналу ІПТ сприяють такі заходи:

- вибір відповідного принципу дії і конфігурації первинного перетворювача:
- оптимізація топології і конструкції пружного елемента ІПТ, технології його виготовлення:
- ретельний вибір способу збирання та засобів кріплення ІПТ до зовнішніх конструктивних елементів закладення ІПТ.

Аналіз літературних даних показує, що ігнорування будь-якого з цих факторів може звести нанівець ефект обліку інших. Із цього випливає висновок про те, що розробка ІПТ середнього класу точності (1%) для масових

застосувань, що працюють у широкому температурному діапазоні, вимагає комплексної та взаємопов'язаної оптимізації принципу дії первинного перетворювача, топології ППТ загалом, технології виготовлення і складання приладів. Застосування відповідних методів обробки вихідного сигналу у вторинному перетворювачі [20,115] можна розглядати, як добре доповнення до вихідної оптимізації, що забезпечує подальше підвищення метрологічних характеристик ППТ.

Перелічені міркування визначають завдання розробки інтегрального перетворювача тиску для загальнопромислового застосування.

4.2. Вибір типу чутливого елемента інтегрального перетворювача тиску

На сьогодні найбільшого поширення в ППТ, так само як і в дискретних застосуваннях, набули тензорезисторні мостові схеми. Одним з уразливих місць таких ППТ є те, що чотири тензорезистори принципово повинні розташовуватися в різних місцях мембрани. При цьому неоднорідне зміна механічних напружень із температурою по контуру прикріплення пружного елемента до корпусу датчика або локальних напружень на межі кремній – оксид (або кремній – нітрид), а також можлива просторова неоднорідність струмів витоку на кордоні тензорезистор – підкладка – всі ці фактори можуть бути відповідальними за більш-менш значний дрейф нуля внаслідок неоднакової зміни опорів тензорезисторів. Точність узгодження характеристик окремих тензорезисторів, будучи в ППТ вельми високою, все ж залишається кінцевою, що додатково призводить до збільшення адитивної складової вихідного сигналу.

У порівнянні з тензорезисторними мостовими схемами ЧЕ ППТ на основі ефекту тензо-е.р.с. (ІТЕПТ) має наступні переваги.

1. ЧЕ не проявляє температурного дрейфу вихідного сигналу за відсутності деформації за умови, що еквіпотенційність вихідних електродів була досягнута технологічно (високий ступінь осьової симетрії). Це означає, що адитивна компонента вихідного сигналу практично відсутня для ІТЕПТ, не поєднаного з корпусом.
2. На відміну від тензорезисторного моста ЧЕ є нечутливим до ізотропної поверхневої деформації, що виникає в зв'язку з різницею в ТКР кремнію і діелектричних покриттів, а також до симетричної поверхневої деформації в напрямку $[100]$, якщо поверхня пластини співпадає з площиною (100) внаслідок ефекту Пуассона.
3. Оскільки ЧЕ є генератором напруги, при використанні його в режимі, близькому до режиму холостого ходу, по виходу число контактів, які вносять шумову компоненту у вихідний сигнал, складає два проти восьми у тензорезисторному мосту. Крім цього дрейф опору контактів у такому ЧЕ не призводить до дрейфу адитивної компоненти вихідного сигналу.
4. ЧЕ є локальним функціональним аналогом тензорезисторного моста і тому його еквіпотенційність за відсутності тиску, крім геометричних факторів, визначається однорідністю дифузії чи імплантації на площі самого перетворювача, а не всієї площі мембрани, як у разі розподіленого тензорезистивного моста [90]. Таким чином, за типових розмірів мембрани 2000×2000 мкм² і ЧЕ 100×200 мкм² отримуємо значний виграш за цим фактором. Єдине, в чому ІТЕПТ поступається ППТ із чотириплечим активним тензорезисторним мостом – це вдвічі менша чутливість. Остання обставина не є критичною в зв'язку з наявністю підсилювачів.

Наведені міркування дозволяють зробити висновок, що перетворювачі на основі ефекту тензо-е.р.с. є найбільш перспективними для інтегральних датчиків тиску у зв'язку з відсутністю в їхніх характеристиках низки істотних недоліків,

властивих тензорезисторним мостам [42–44]. Підтвердження сказаного – прийнятні параметри єдиного серійного інтегрального датчика тиску на основі ефекту тензо-е.р.с. [6,7].

4.3. Оптимізація топології пружного елемента і конструкції інтегрального перетворювача тиску

Основною для ІТЕПТ умовою високої ефективності перетворення тиску в пропорційний електричний сигнал є максимальна різниця поздовжньої і поперечної компонент механічної напруги в області, де розташований ЧЕ, причому відповідні компоненти повинні бути спрямовані вздовж осей $\langle 110 \rangle$, а тягнуче поле прикладається в напрямку $\langle 100 \rangle$.

Таке взаємне розташування напрямків деформації і тягнучого поля дає в порівнянні з колінеарним випадком вииграш по чутливості в 1,41 рази. Найбільш проста реалізація цієї умови – вибір відповідної області на периферії однорідної плоскої мембрани для розміщення ЧЕ – використано в [6]. За такого рішення ЧЕ розташовується в області суттєво неоднорідної деформації (рис. 4.1).

Високі градієнти радіальної і тангенціальної компонент механічної напруги і залежність епюр напруги від глибини травлення зумовлюють високу критичність до точності позиціювання ЧЕ. Ця обставина, а також схильність до впливу механічних напружень, що виникають на периферії пружного елемента, змушують шукати інші рішення.

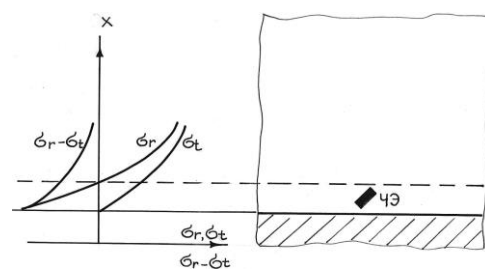


Рис. 4.1 Епюри діючих компонент механічної напруги ЧЕ розташованого на периферії плоскої мембрани

Ефективність перетворення гідростатичного тиску в одноосьову напругу можна підвищити, використовуючи як пружний елемент мембрану складного

профілю з концентраторами напруги [25,136,147]. Реалізація такого підходу визначила вибір як пружного елемента ІТЕПТ симетричної мембрани з двома острівцями-потовщеннями, які виконують роль концентраторів.

На рис. 4.2 умовно показано її форму. ЧЕ розташований в центрі мембрани між острівцями, його поздовжня вісь складає 45 градусів із віссю симетрії мембрани. Така конфігурація забезпечує ефективне перетворення тиску вимірюваного середовища в одноосьову напругу і водночас максимально можливу віддаленість первинного

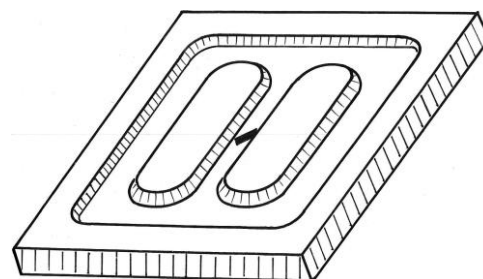


Рис. 4.2 Форма пружного елемента інтегрального перетворювача тиску (МЕМС). Конфігурацію показано умовно; пропорції не дотримані.

перетворювача від області виникнення термопружних напруг на периферії мембрани. Градієнти поздовжньої і поперечної компонент механічної напруги в центральній області такого ПЕ близькі до нуля (рис. 4.3), що значно знижує вимоги до точності позиціювання ЧЕ в порівнянні з [6]. Розрахунок тривимірного ПЕ зі складним профілем, що враховує анізотропію механічних властивостей кремнію, не є завданням, яке можливо аналітично розв'язати, тому оптимізацію мікропрофілю мембрани проводили емпірично, на основі наближених розрахунків.

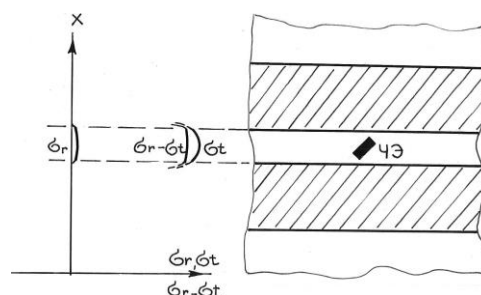


Рис. 4.3 Епюри діючих компонент механічної напруги ЧЕ розташованого в центрі профільованої мембрани

Наслідком зазначеного у вступі процесу фізико-конструктивної інтеграції перетворювачів і специфічною особливістю ІПТ є істотний вплив конструкції ІТЕПТ на його параметри. Невдало обраний метод кріплення первинного перетворювача до корпусу або неузгоджені коефіцієнти розширення матеріалів корпусу і пружного елемента служать джерелами адитивної похибки.

Ефективними методами мінімізації похибок, пов'язаних з ефектами температурного розширення, є з'єднання кремнієвої мембрани з кремнієвою ж підкладкою [127], або зі скляною підкладкою з підібраним температурним коефіцієнтом розширення (ТКР) по відношенню до кремнію. Важливим фактором є також і форма підкладки, а саме її жорсткість, приведена до контура кріплення, яка повинна відповідати жорсткості пружного елемента.

З урахуванням цих міркувань було запропоновано конструкцію ІТЕПТ, що складається з двох з'єднаних пластин кремнію, кожна з яких має витравлені ділянки (рис. 4.4). При виготовленні перетворювача абсолютного тиску з'єднання здійснюється в вакуумі. У центрі однієї з пластин, яка є ПЕ, розташовується ЧЕ, а на її периферії – термочутливий елемент схеми термокомпенсації. На поверхні іншої пластини, яка є кришкою, витравлюють порожнину, що збігається за розмірами із зовнішнім контуром мембрани. Товщину тонкої частини кришки вибирають із міркувань жорсткості, яка повинна наближатися до жорсткості чутливого елемента [7]. До зовнішніх конструктивних елементів ІТЕПТ кріплять зовнішньою поверхнею кришки за допомогою гумоподібного компаунда. Така конструкція забезпечує істотне пригнічення в зоні розташування ЧЕ термопружних напруг, що виникають по контуру скріплення пластин. Додаткове зниження механічної напруги забезпечує подвійна оправа ПЕ (екранне кільце) [70] (на рис. 4.3 і 4.4 не показано). Остання значно знижує вплив температурних деформацій по контуру скріплення на вихідний сигнал ІТЕПТ. Неминуча при цьому втрата жорсткості, а з нею і перевантажувальна здатність пружного елемента [6] компенсується за рахунок наявності острівців-концентраторів [147].

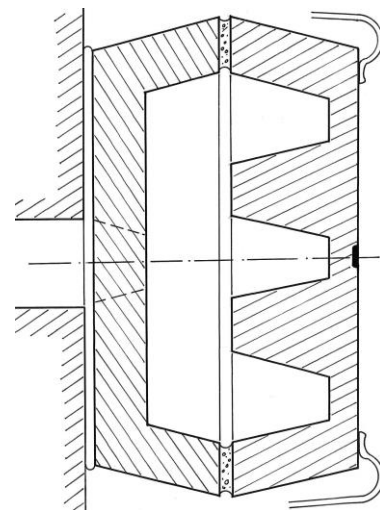


Рис. 4.4 Поперечний переріз ІТЕПТ пропонуваної конструкції; пропорції не дотримані.

4.4 Мікропрофілювання пружного елемента

При виготовленні сучасних ІПТ для формування чутливого елемента використовують різні фізико-хімічні методи [64,104,137]. Механічну обробку кремнію застосовують лише на етапі підготовки пластин з огляду на її відносно невисоку точність і технологічність. Широко використовувані для мікропрофілювання чутливих елементів ІПТ методи травлення кремнію розрізняються складом і агрегатним станом травителя, структурою і складністю необхідного обладнання, швидкістю і дозвільною здатністю процесу, а також іншими факторами [53,122]. У результаті порівняльного аналізу відомих методів формоутворення, з урахуванням необхідних розмірів, конфігурації і профілю дна мезаструктур пружного елемента було обрано оптимальний варіант технології – анізотропне лужне травлення кремнію. До переваг цього варіанта можна віднести:

- процес досліджено багатьма авторами [16,23], він забезпечує хорошу передбачуваність результатів і відтворюваність розмірів;
- технологія не вимагає застосування дорогого устаткування;
- оптимальний режим травлення забезпечує отримання достатньо досконалих плоских граней структури;
- надійне маскування при травленні може забезпечувати двоокис або нітрид кремнію;
- травильник є доступною і порівняно низькотоксичною речовиною.

4.4.1. Особливості лужного анізотропного травлення кремнію

За анізотропного травлення відбувається складний тривимірний процес розчинення кремнію, в результаті чого отримуємо мезаструктуру, межі якої відносять до кількох типів кристалографічних площин. Конкретний набір типів і швидкість травлення площин кожного типу визначається складом травителя і режимом травлення, причому за різних режимів травлення співвідношення

відповідних швидкостей змінюється [58]. Тому розрахунку форми ПЕ і відповідного йому шаблону передуює вибір режиму травлення. Оптимальним варіантом є використання як травильника розчину їдкого калію у воді концентрації 350 г/л за температури 100°C [69]. У цьому режимі отримуємо досить високу швидкість травлення кремнію в глибину за допустимої швидкості травлення захисного шару [23]. Дно структури, що утворюється, стає блискучим, без видимих виступів або западин, висота мікронерівностей не перевищує 0,5 мкм. Швидкості травлення площин різних типів дорівнюють $V_{111} = 0,1$, $V_{100} = 3$, $V_{110} = 4,4$, $V_{311} = 4,6$ мкм/хв [24]. Швидкість травлення захисного шару оксиду – близько 0,07 мкм / хв, що має бути за оціночних розрахунків $V_{SiO_2} = 0$.

При травленні кремнію в КОН для внутрішніх фігур структури (кут вікна в шаблоні менше 180 градусів) є характерним розширення граней $\{111\}$ за рахунок звуження граней $\{100\}$. Для зовнішніх фігур (кут вікна понад 180 градусів) є характерним звуження граней $\{100\}$, розширення граней $\{111\}$ і переважне розширення граней $\{311\}$ аж до повного поглинання інших граней. Грані інших типів $\{110\}$, $\{211\}$, $\{210\}$ та ін.), що виникають у процесі травлення, швидко поглинаються за розвитку згаданих граней, тому за досить тривалого травлення їх можна не враховувати. Таким чином, для попереднього розрахунку форми утворюваного чутливого елемента досить проаналізувати динаміку розвитку граней, які відносять до трьох типів кристалографічних площин: $\{100\}$, $\{111\}$ і $\{311\}$. При цьому передбачається, що поверхня вихідної пластини з шаблоном збігається з площиною типу $\{100\}$.

На рис. 4.5 показано грані трьох основних типів, які утворюються в процесі травлення. Для кожної грані наведено проекції швидкостей

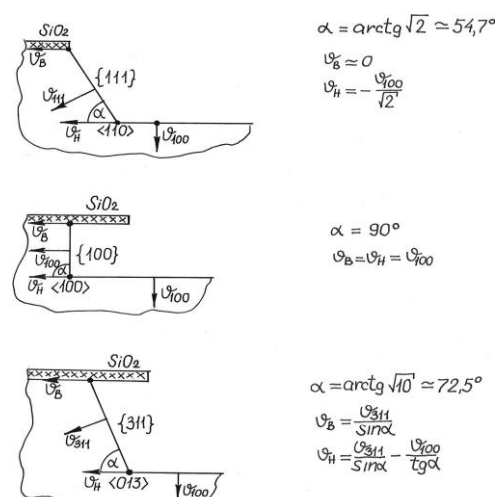


Рис. 4.5 Основні типи граней мезаструктури, що утворюється в процесі травлення Si в КОН

руху верхнього і нижнього ребер на площину шаблону і характерні кути. Відзначимо, що зародками наведених граней служать відрізки контуру шаблону, спрямовані вздовж кристалографічних напрямків $\langle 110 \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 013 \rangle$ для граней $\{111\}$, $\{100\}$, $\{311\}$ відповідно. Крім цього, грані типу $\{311\}$ зароджуються на зовнішніх прямих кутах шаблону. Це явище, відоме як розтравлення кутів, показано на рис. 4.6. Там же наведено значення характерних кутів і швидкостей травлення.

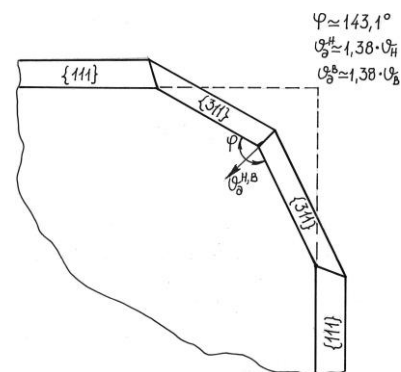


Рис. 4.6 Розтравлення кутів в КОН

4.4.2. Опис установки для травлення

Процес лужного анізотропного травлення кремнію добре контролюють і він забезпечує відтворюваність необхідних розмірів за строго фіксованих умов, для яких виконували розрахунки, а саме – задані температура і склад розчину. Для забезпечення таких умов було розроблено установку, схему якої наведено на рис. 4.7. Вона складається з травильної ванни, касети для пластин, конденсатора, пристрою для перемішування розчину і пристрою для підтримки температурного режиму.

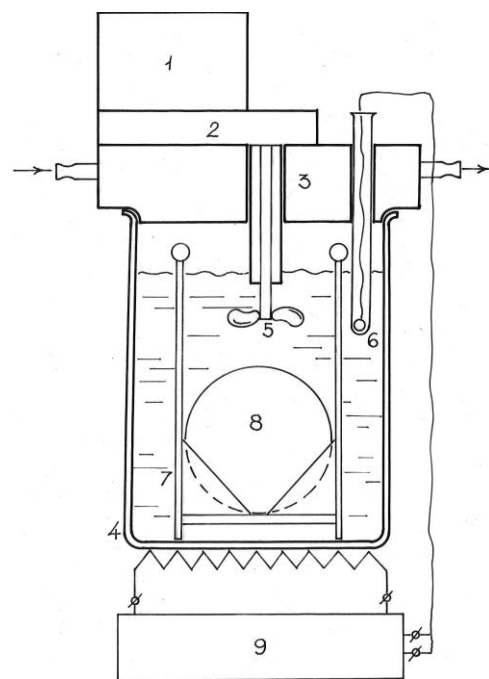


Рис. 4.7 Схема установки для травлення Si в КОН.

Травильну ванну виготовлено з нержавіючої сталі. Касета складається з фторопластових тримачів із прорізами для

- 1 - двигун, 2 - редуктор,
- 3 - конденсатор, 4 - травильна ванна,
- 5 - насадка, 6 - датчик температури,
- 7 - касета, 8 - кремнієва пластина,
- 9 - обладнання термостатування.

пластин, укріплених на сталевих стяжках з кільцями для зручності швидкого виймання з травильного розчину. Конденсатор є циліндричною камерою з нержавіючої сталі з двома штуцерами для підведення охолоджуючої води. Наявність конденсатора забезпечує сталість концентрації розчину за тривалого травлення. Пристрій для перемішування розчину складається з двигуна з редуктором, на вихідній осі якого закріплено насадку. Розмір і форму насадки обрано з урахуванням швидкості обертання і об'єму ванни так, щоб забезпечити інтенсивне перемішування розчину. Тим самим постійна концентрація розчину підтримується не тільки за об'ємом загалом, але й локально, у всіх точках поверхні кожної пластини. Пристрій підтримки температурного режиму включає в себе нагрівач і терморегулятор з датчиком температури.

4.4.3. Шаблон для виготовлення пружного елемента

Тривимірний динамічний процес травлення призводить до того, що форма проєкцій фігур, які отримують у результаті травлення, на поверхню вихідної пластини може значно відрізнятися від форми фігур на використаному шаблоні, що вимагає побудови так званих *фігур попередження*. Задача розрахунку шаблону ускладнюється наявністю суперечливих вимог. У цьому випадку це прагнення отримати найбільш плавний контур острівця і необхідне для цього розширення фігур попередження, і водночас прагнення отримати "долину" між острівцями мінімальної ширини і максимальної довжини, що вимагає скорочення фігур попередження. Тому

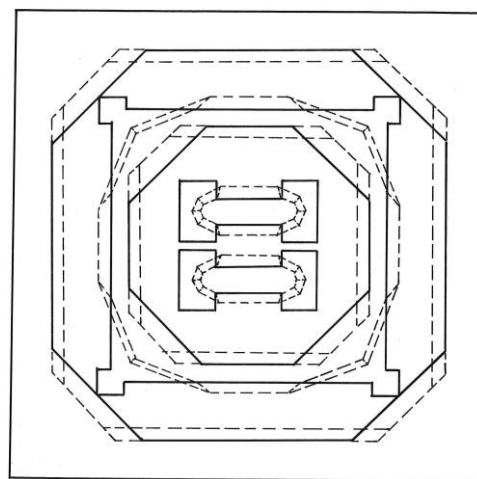


Рис. 4.8 Шаблон для формування пружного елемента - суцільні лінії. Мезаструктура, отримана в результаті травлення кремнієвої пластини в КОН з приведеним шаблоном впродовж 80 хвилин, - пунктирні лінії.

конфігурація шаблону для формування мезаструктур виходить компромісною щодо кількох чинників.

Форму шаблону для формування мікропрофілю пружного елемента ІПЕПД на номінальний тиск 1 МПа наведено на рис. 4.8. Форма мезаструктури, що утворюється, забезпечує ефективне перетворення розподіленого по площі ПЕ тиску в близьку до одноосової напруги в центральній області ПЕ, необхідної для роботи ЧЕ за прийнятної форми контуру острівців, що зумовлює достатній запас міцності. На цьому ж малюнку зображено контури граней, які утворюються в результаті травлення кремнієвої пластини в описаній установці упродовж 80 хв.

Шаблон розраховано на використання пластин КЕФ-1,0 товщиною 350 мкм за глибини травлення 250 мкм, що відповідає товщині мембрани ПЕ – 100 мкм. Слід зазначити, що конфігурація шаблону індивідуальна для пружного елемента певної форми і глибини травлення. Це призводить до необхідності контролю товщини вихідних пластин кремнію і часу травлення у встановленому режимі.

4.4 Компенсація температурного зміни чутливості ІТЕПТ

У запропонованій конструкції ЧЕ ІТЕПТ є область p -типу з питомим опором близько 450 Ом на квадрат (поверхнева концентрація акцепторів – $2,5 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$). Температурна залежність чутливості такого ЧЕ в діапазоні 233 ... 393К виражається залежністю [89]:

$$a_{yx} \propto T^{-0,65}. \quad (4.1)$$

Для компенсації зміни чутливості ЧЕ в діапазоні робочих температур запропоновано простий пасивний ланцюг термокомпенсації (ТК). Роботу ланцюга ТК засновано на зміні напруги U_{EB} транзистора з температурою. Схему ланцюга ТК наведено на рис. 4.9.

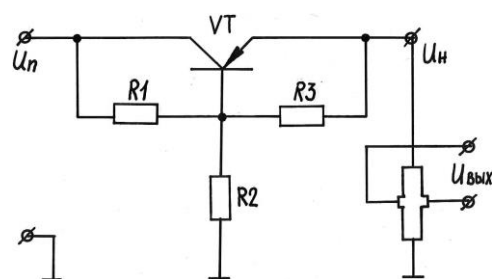


Рис. 4.9 Схема ланцюга температурної компенсації чутливості ІТЕПТ

Ланцюг ТК забезпечує можливість регулювання як температурного коефіцієнта вихідної напруги, так і початкової вихідної напруги при 293К шляхом зміни співвідношення опорів резисторів. Оціночний розрахунок ланцюга ТК, виконаний в припущенні лінійної залежності від температури і $h_{21e} \gg 10$ відносно R1, R2, дає:

$$R1 = R3 \frac{U_n}{U_H} \frac{\beta U_0 - \alpha U_H}{U_0 (\alpha + \beta)} \quad (4.2)$$

$$R2 = R3 \frac{U_n}{U_0} \frac{\beta U_0 - \alpha U_H}{\beta U_0 - U_H (\alpha + \beta)},$$

де: E_n – напруга живлення;

U_H – номінальна напруга на ЧЕ при 293К;

U_0 – напруга U_{eB} транзистора при 293К;

α – температурний коефіцієнт зміни U_H , що вимагається;

β – температурний коефіцієнт зміни U_{eB} транзистора.

Випробування термокомпенсуючого ланцюга на дискретному транзисторі КТ315 із розрахованими значеннями резисторів R1 = 1,3 ком, R2 = 1,3 ком, R3 = 3,9 ком у діапазоні температур 273 ... 373К показали хороший збіг результатів із розрахунковими даними. Значення виявилось таким, що дорівнює $1,44 \times 10^{-3}$ проти розрахункового $1,5 \times 10^{-3}$. Такий ланцюг ТК, забезпечуючи лінійну залежність напруги живлення ЧЕ від температури, може, в принципі, компенсувати зміну чутливості обраного ЧЕ з точністю не гірше 0,5% у діапазоні температур 233 ... 393К.

Резистори схеми термокомпенсації можуть бути як інтегральними (це вимагає попереднього експериментального уточнення співвідношення між ними), так і навісними, що дає можливість оперативного підстроювання. При виготовленні та випробуванні дослідних зразків перетворювача було реалізовано другий підхід.

4.5. Питання технології виготовлення ІТЕПТ

4.5.1. Групові шаблони для виготовлення ІТЕПТ

На рис. 4.10 наведено ескіз суміщеного шаблону для формування дифузійних областей і контактних майданчиків первинного перетворювача. Розміри ЧЕ, розміщеного в центрі – 90x180 мкм. Для зниження термопружних напруг ділянки металізації винесено за межі тонкої частини ПЕ на його периферію. Там же розміщено транзистор ланцюга ТК.

Групові шаблони, отримані мультиплікацією вихідного шаблону, мають низку особливостей. Груповий шаблон для травлення не повинен мати зазорів на кордонах окремих кристалів. Також на кожній пластині, крім міток двостороннього сполучення, виготовляють ще групу направляючих отворів, які служать для взаємного поєднання пластин у процесі з'єднання, що має бути враховано в шаблонах. Отвори в пластинах виготовлено методом зустрічного анізотропного травлення в єдиному циклі з мікропрофілюванням. Крім цього, на периферії кожної пластини кілька "холостих" кристалів повністю металізуються. Таким чином створюють контактні площадки достатньої площі, необхідні за електростатичного з'єднання пластин.

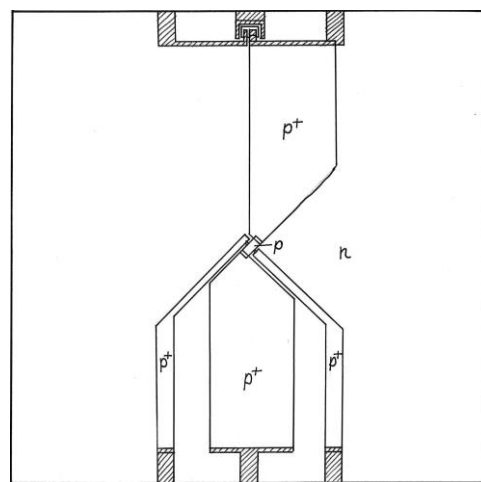


Рис. 4.10 Поєднаний шаблон для формування дифузійних областей і контактних майданчиків ІТЕПТ

Необхідна точність орієнтування шаблонів щодо міток напрямку $\langle 110 \rangle$ на пластинах при фотолітографії – 0,5 ... 1 градус.

4.5.2. Діелектричне покриття

Істотний вплив на параметри датчиків, розрахованих на вимір малих тисків, може надати температурнезалежний натяг мембрани, викликаний істотним

розходженням в температурних коефіцієнтів розширення (ТКР) кремнію (бл. $2,5 \times 10^{-6}$ 1/град) і двоокису кремнію ($0,43 \times 10^{-6}$ 1/град) [62,87,144]. Для компенсації цього впливу запропоновано наступну послідовність технологічних прийомів.

Процес виготовлення ПЕ проводять у два етапи: спочатку формують мембрану, потім видаляють шар оксиду, що залишився, проводять повторне двостороннє окислення структури з товщиною оксиду близько 0,8 мкм, а потім формують дифузійні області плоскої частини мембрани. Шари оксиду однакової товщини з двох сторін ПЕ забезпечують локальну компенсацію макронапружень за умови, що мембрана не втратить стійкості. Остання залежить від товщини шару оксиду, яка не повинна перевищувати деяку критичну величину [111].

4.5.3. З'єднання пластин кремнію

При виготовленні ІПТ для з'єднання пластин кремнію між собою і з елементами конструкції використовують різні методи, такі як склеювання склоцементу епоксидними компаундами, різними клеями, припаювання кремнію до металу за допомогою евтектик золото – олово, кремній – золото, кремній – алюміній, електрофізичні методи з'єднання [90]. Із цих методів найбільш прийнятним для групової технології складання ІПТ є метод низькотемпературної електростатичної пайки кремнію із застосуванням скла [116,145]. Він дозволяє з'єднувати кремній з кремнієм, кремній зі склом, при цьому на поверхні кремнію може бути шар оксиду довільної товщини. За даними [128] цей метод забезпечує мінімальну тимчасову нестабільність з'єднання.

При з'єднанні двох кремнієвих пластин як сполучної субстанції використовують боросилікатне скло типу «Пайрекс» [145]. Близький до кремнію ТКР ($2,8 \times 10^{-6}$ 1 / град) дозволяє звести до мінімуму термпружні напруги на межі кремній – скло, що виникають у процесі з'єднання і подальшої експлуатації ІТЕПТ. Детальний опис технології з'єднання наведено в [116].

4.5.4. Блок-схема технологічного циклу виготовлення ІТЕПТ

На рис. 4.11 наведено блок-схему технологічного циклу виготовлення ІТЕПТ. Запропонована послідовність може варіюватися в залежності від наявного обладнання, що застосовується, вихідних матеріалів і технологічних можливостей виробника. У підсумку затвердження технологічної карти проводять після аналізу результатів випробувань дослідної партії ІТЕПТ і подальшого коректування. Тому запропонована блок-схема задає лише принципові технологічні моменти.



Рис. 4.11 Блок-схема технологічного циклу виготовлення ІТЕПТ

Виготовлення ЧЕ можна проводити імплантацією іонів бору з подальшим відпалом, або дифузією. Існують дані про те, що застосування іонної імплантації створює радіаційні дефекти в ПЕ, знижуючи його міцність [104]. Тому дифузійне виготовлення відповідних областей первинного перетворювача має переваги. Зниження міцності ПЕ також може бути викликано високою поверхневою концентрацією бору в області дифузійних провідників, що з'єднують первинний перетворювач з контактними майданчиками ІТЕПТ, за рахунок виникнення дислокацій і дефектів упаковки.

Запропонована технологія передбачає використання пластин із кремнію марки «КЕФ-1,0» товщиною 350 мкм, поверхня яких збігається з кристалографічною площиною $\{001\}$ і має мітки напрямку $\langle 110 \rangle$.

Щільність дислокацій на вихідних пластинах повинна бути в межах 10 ... 100 на квадратний сантиметр. Останній фактор значною мірою визначає межу міцності ІТЕПТ.

Виготовлення пластин з кришками проводять за аналогічним циклом. Тут істотно нижчими є вимоги до бездислокаційності вихідного кремнію і розкиду товщини пластин (придатним є кремній зі щільністю дислокацій $1 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ і пластини з розкидом по товщині 15 мкм без сортування). Додатковою операцією тут буде нанесення на відповідну поверхню пластини шару боросилікатного скла товщиною 3 ... 5 мкм за допомогою високочастотного іонно-плазмового розпилення [88].

4.6. Результати випробувань тестових зразків

Різні варіанти пропонованої технології було випробувано в наступних організаціях – ІФН АНУ, ПО "Кристал", м. Київ; НДІ "Шторм", м. Одеса; НВО "Інтеграл", м. Мінськ. У результаті було виготовлено і випробувано тестові партії ІТЕПТ. На Рис. 4.12 показано мікрофотографії виготовлених структур ІТЕПТ.

Чутливість ІТЕПТ із мембраною товщиною 100 мкм і робочим діапазоном тисків 0...1 МПа склала 0,02 1/МПа за напруги живлення 5 В. Значення нульового сигналу при 300К для більшості випробуваних зразків

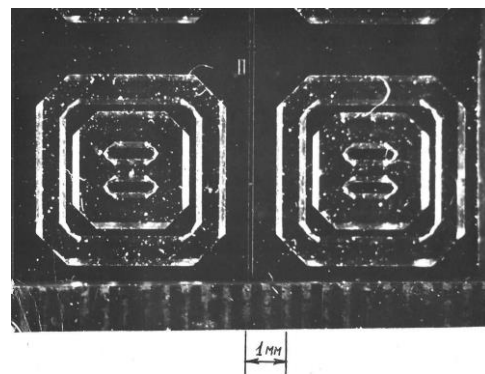


Рис. 4.12 Мезаструктури, отримані в результаті травлення

склало 0,5...1,5 мВ. Дрейф нульового сигналу для 90% ІТЕПТ, не поєднаних із корпусом, склав менше 1 мВ в діапазоні температур 233...393К, причому два зразки виявили дрейф близько 0,2 мВ. При з'єднанні з корпусом дрейф нульового сигналу зростав до 2 мВ у тому ж діапазоні температур, що становить 2% від вихідного сигналу 100 мВ за номінального тиску 1 МПа. При випробуванні на перевантаження ПЕ руйнування мембрани наступало при 2,0 МПа, тобто за 100%-го перевантаження. Таким чином, результати випробувань пробних зразків підтвердили високі параметри пропонованого ІТЕПТ.

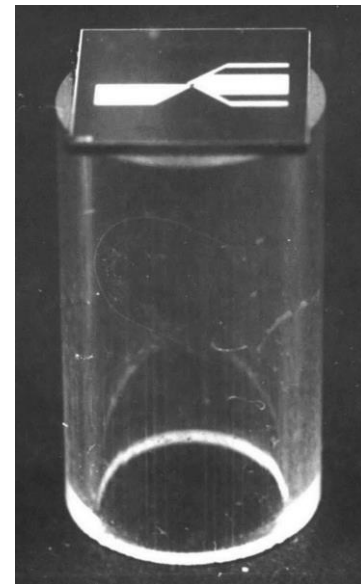


Рис. 4.13 МЕМС-ІТЕПТ закріплений на трубці боросилікатного скла

На Рис.4.13 наведено фотографію ІТЕПТ, закріпленого на трубці з боросилікатного скла за допомогою технології, описаної в [116].

4.7. Діагностика напружень в ІТЕПТ

Незважаючи на вжиті заходи з мінімізації «паразитних» механічних напруг у ЧЕ, останні завжди присутні в меза-структурі кремнієвої мембрани, що і є ЧЕ і які впливають на метрологічні характеристики перетворювача. У вільному від закріплення в корпусі чутливому елементі наявність деформації (механічної напруги) може бути зумовленою кількома причинами. До них відносять неоднорідний профіль мембрани і пов'язану з ним компоненту градієнта поверхневого натягу, неоднорідне легування кристала при створенні перетворювача, а також неоднорідний градієнт температури внаслідок розігріву перетворювача струмом живлення. Ефекти, викликані першими двома факторами, є адитивними.

Для експериментального вимірювання внутрішньої напруги використовували оптико-поляризаційний метод, модифікований застосуванням модуляції поляризації зондуючого випромінювання. Методику експерименту описано в [149], тут же наведено результати вимірювань.

У результаті застосування техніки модуляційної поляриметрії в МЕМС-приладі, яким є ІТЕПТ, визначено походження величин і координатні локалізації механічної напруги – Рис.4.14. Координатні розподіли одноосьових напруг виміряно в двох випадках – залишкові від локальних

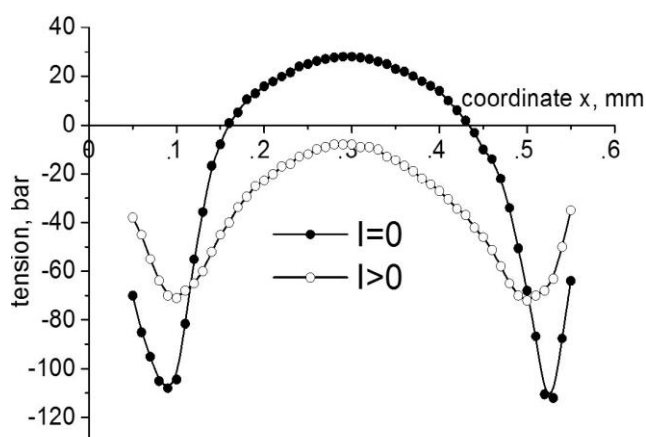


Рис. 4.14 Локалізація механічної напруги в МЕМС-ІТЕПТ

неоднорідностей легування кристала (темні точки), і напруги, зумовлені розігрівом від струму, що протікає (світлі точки).

Отримані результати дозволили визначити внутрішню напругу, індуковану тепловим потоком, як різницю кривих – Рис. 4.15. Водночас було визначено максимальну напругу живлення, за якої розігрів і пов'язаний з ним сигнал похибки не перевищує 50% від класу точності перетворювача. Виявилось, що вона дорівнює 4,2 В, внаслідок чого рекомендована напруга живлення була обрана такою, що дорівнює 4 В.

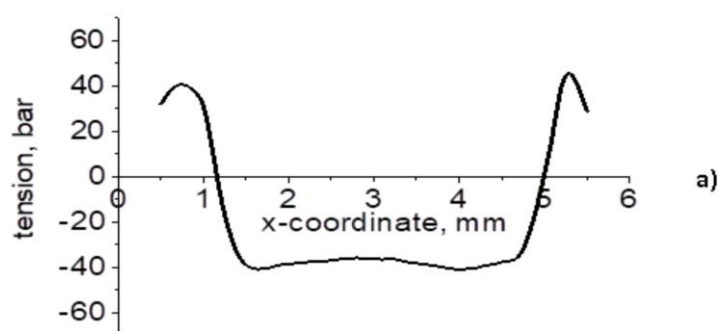


Рис. 4.15 Механічна напруга, що індукується тепловим потоком в перетині зразка.

ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

1. На основі комплексної фізико-конструктивно-технологічної оптимізації проектування інтегрального перетворювача тиску запропоновано: тип чутливого елемента, топологія пружного елемента, конструкція і спосіб збирання приладу, призначеного для роботи в діапазоні температур 233–393К.
2. Наведено технологічний цикл виготовлення ІТЕПТ, що забезпечує отримання перетворювача зі зниженою в 5 ... 15 разів, у порівнянні з тензорезисторними ІПТ [90], адитивної складової вихідного сигналу в широкому діапазоні температур. Набір шаблонів розраховано на виготовлення ІТЕПТ із номінальним тиском 1 МПа.
3. Розроблено і випробувано на експериментальному зразку простий ланцюг термокомпенсації, здатний забезпечити компенсацію зміни чутливості ЧЕ ІТЕПТ із точністю 0,5% у діапазоні температур 233 ... 393К.
4. Випробувано тестові зразки ІТЕПТ. Отримано результати, що підтверджують ефективність запропонованих рішень, зокрема, знижений дрейф адитивної складової вихідного сигналу в порівнянні з [6] с 30% до 2% за чутливості ІТЕПТ 0,02 МПа-1.
5. Вимірювання внутрішніх напружень в області ЧЕ, отримані модифікованим оптико-поляризаційним методом, показали високу діагностичну ефективність останнього і дозволили визначити максимальну напругу живлення, за якої зберігаються високі метрологічні характеристики ІТЕПТ, що дорівнюють 4-м вольтам.

Розділ 5. ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ ТЕНЗОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Результати досліджень ефекту тензо-е.р.с., отримані у другому розділі, створюють передумови для створення дискретних ТЕП, призначених для роботи в вимірювальних приладах класу точності 1% і вище з широким температурним діапазоном. Завданнями, які необхідно для цього вирішити, є вибір оптимального матеріалу для виготовлення ТЕП, мінімізація впливу елементів конструкції на результуючу похибку приладу і розробка пристрою термокомпенсації чутливості ТЕП.

5.1. Дистанційні перетворювачі тиску

Однією з найважливіших проблем економіки є пошук і освоєння нових паливних ресурсів. Певною мірою її вирішення здійснюють шляхом вилучення рідких вуглеводнів із бітумних порід, що залягають на невеликих глибинах. Важливу роль при цьому відводять розробці та створенню засобів, призначених для проведення гідродинамічних досліджень із метою визначення фільтраційних параметрів продуктивних пластів і контролю процесу розробки бітумних покладів за різних впливів на пласт. Для цієї мети є необхідними надійні дистанційні прилади, що дозволяють перетворювати в пропорційний електричний сигнал значення надлишкового тиску рідини і температури в свердловинах на бітумних родовищах. Такими приладами, розробленими в ІФН АНУ спільно з «ТатНИПИНефть», є дистанційні перетворювачі ПДМ-2 і ПДМТ-1 [78,79,82].

5.1.1. Рішення ключових завдань розробки приладів

Вибір оптимального матеріалу для виготовлення ТЕП проводили з урахуванням необхідних експлуатаційних параметрів приладу загалом. Для реєстрації вихідного сигналу перетворювача тиску передбачалося використовувати самописні потенціометри типу ЕПП-09 або їм подібні, які

підключають безпосередньо до виходу ТЕП, тому вихідний опір ТЕП не повинен перевищувати 200...300 Ом. З іншого боку, діапазон вимірюваних тисків 0...2,5 МПа, а також припустиме значення номінального напруги в перетині тензоперетворювача $P_x \leq 200$ МПа призводять до вибору його поперечного перерізу, що дорівнює близько 2 мм². Зазначені міркування обмежують верхню межу питомого опору ТЕП значенням 10 Ом. см. Одночасне виконання зазначених умов визначає питомий опір вихідного матеріалу $\rho = 10$ Ом см. Одночасне виконання цієї умови і вимоги мінімізації нелінійності характеристики зумовили вибір як вихідного матеріалу для виготовлення ТЕП кремнію марки КЕФ-10.

Як трансформатор гідростатичного тиску робочого середовища в одноосьову деформацію ТЕП у розроблених приладах використано сильфон. Таке рішення дозволяє компенсувати термпружні напруги, зумовлені великою різницею коефіцієнтів лінійного розширення кремнію ($2,5 \times 10^{-6}$ 1 / град за 300К) і конструкційних матеріалів корпусів приладів (12×10^{-6} 1 / град) і значною температурною залежністю самих коефіцієнтів. З огляду на те, що жорсткість сильфона, як буде показано, значно менша жорсткості ТЕП, адитивна компонента вихідного сигналу, зумовлена термпружними напругами в такій конструкції, послаблена до значень, порівнянних з іншими джерелами похибок.

За номінального вимірюваного тиску 2,5 МПа, поперечного перерізу 2×10^{-6} м² і номінальної механічної напруги в перерізі ТЕП 160 МПа ефективна площа сильфона складе:

$$S_{\text{эфф}} = \frac{160 \times 10^6 \times 2 \times 10^{-6}}{2,5 \times 10^6} = 1,25 \times 10^{-4} [\text{м}^2]. \quad (5.1)$$

Вибір сильфона зі сплаву 36НХТЮ з ефективною площею $1,25 \times 10^{-4}$ м дозволяє проводити вимірювання в відносно агресивному середовищі. Номінальному тиску 2,5 МПа відповідає сильфон із товщиною стінки 0,12 мм. Таким чином,

тип обраного сільфона, що забезпечує необхідні параметри приладу, є наступним: 16х10х0,12-36НХТЮ ГОСТ 11915-72. Жорсткість по силі такого сільфона за кількості гофрів, що дорівнюють 5, становить $2,8 \times 10^4$ Н/м.

Жорсткість за тиском – $2,24 \times 10^2$ МПа/м. Жорсткість за тиском кремнієвого тензоперетворювача становить $1,6 \times 10^7$ МПа/м, що орієнтовно в 10^5 разів більше жорсткості сільфона.

Таким чином, використання сільфона вищезазначеного типу як перетворюючого елемента забезпечує необхідну механічну розв'язку ТЕП від корпусу приладу і тим самим вирішує проблеми, пов'язані з різницею температурних коефіцієнтів розширення елементів конструкції і ТЕП. Конструкцію вузла первинного перетворювача наведено на рис 5.1.

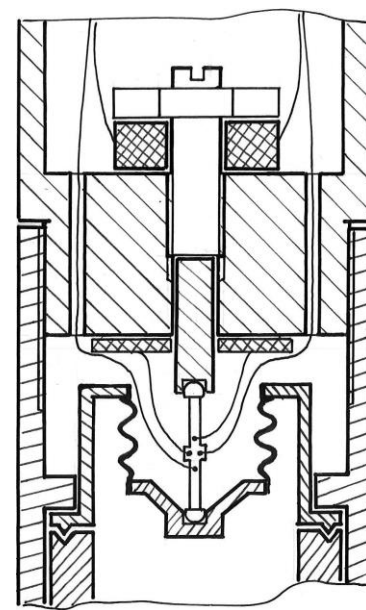


Рис.5.1 Конструкція вузла первинного перетворювача дистанційного манометра

У зв'язку з тим, що в діапазоні температур 250...375К чутливість ТЕП змінюється за законом $\propto T^{-0,92}$, для повної температурної компенсації цієї

зміни необхідно, щоб закон зміни напруги живлення ТЕП описували функцією, зворотною зазначеній. Оскільки модуль показника ступеня близький до одиниці, стало можливим використовувати для термокомпенсації лінійну функцію. Похибка компенсації при цьому становить: в діапазоні 273...353К – 0,05%, в діапазоні 250...375К – 0,2%. Схему блока термокомпенсації, що реалізує наведений принцип, запропоновано в [4] і використано при розробці приладів. У схемі здійснюється активна компенсація за вхідним ланцюгом.

Схема являє собою компенсаційний стабілізатор напруги з термозалежними елементами (рис. 5.2). Цю роль виконують стабілітрон VD1 [106] і ланцюжок діодів VD3...VDN, що працюють у режимі стабісторів. Як відомо, температурний коефіцієнт напруги стабілізації кремнієвих стабілітронів залежить від абсолютного значення $U_{ст}$. Напруга на потенціометрі R3 є різницею напруг на стабілітроні і діодах. Варіюючи $U_{ст}$ стабілітрона і кількість діодів у ланцюжку, можна отримувати різні значення температурного коефіцієнта зміни напруги на потенціометрі R3. У схемі передбачено можливість плавного регулювання температурної залежності напруги живлення ТЕП за допомогою потенціометра R2. Напругу стабілізації VD2 вибрано таку, що дорівнює 14 В. При цьому $TKU \gg 0$. Напруга на потенціометрі R3, а отже, і на ТЕП лінійно зростає з підвищенням температури. Наявність потенціометра R3 дає можливість калібрувати перетворювач.

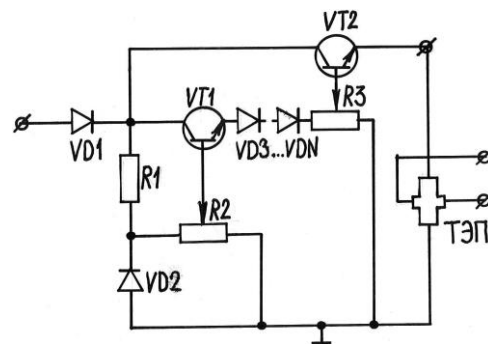


Рис. 5.2 Схема блоку термокомпенсации чутливості ТЕП

Побудова блока термокомпенсації за схемою стабілізатора напруги знижує чутливість приладу до зміни напруги живлення. Розроблена схема забезпечує компенсацію зміни чутливості ТЕП із температурою за умови хорошого теплового контакту між ТЕП і чутливими елементами блока термокомпенсації.

5.1.2. Функціональне призначення і технічні характеристики ПДМ- 2

Перетворювач дистанційний манометричний типу ПДМ-2 призначено для перетворення в пропорційний електричний сигнал постійних і змінних у часі значень тиску по стовбуру і на забої свердловин на бітумних родовищах. Спуск

приладу в свердловину здійснюють на трижильному каротажному кабелі типу КТБ-6.

Основні параметри приладу ПДМ-2

Діапазон вимірюваних тисків, МПа - 0 ... 2,5
 максимальна нелінійність характеристики навантаження прилада, % <5
 робочий діапазон температур перетворювача, ° С 0...+ 60
 вихідна напруга, відповідна верхній межі вимірюваних тисків, мВ 100
 наведена похибка перетворювача в діапазоні робочих температур, % $\pm 1,5$
 напруга живлення приладу постійна, В 24

Конструкцію ПДМ-2, який є прототипом приладу ПДМТ-1, розглянуто в 5.1.4.

5.1.3. Результати випробувань ПДМ-2

Державні приймальні випробування перетворювача дистанційного манометричного типу ПДМ-2 проходили на заводі "Нефтеавтоматика", м. Бугульма Татарської РСР. На випробування було представлено п'ять дослідних зразків перетворювача, з яких три пройшли повний цикл випробувань відповідно до вимог і методики ТУ 39-09-046-76. Характеристики випробуваних приладів повністю відповідали вихідним завданням, величина основної зведеної похибки не перевищила 0,75% проти 1,5% за завданням. Із недоліків приладу було відзначено значну інерційність встановлення теплового режиму і вузький діапазон допустимих відхилень напруги живлення. Загалом прилади випробування витримали. Державна комісія запропонувала *Перетворювач свердловинний манометричний дистанційний* затвердити, внести до Державного реєстру та дозволити Бугульминському дослідному заводу "Нефтеавтоматика" виготовлення настановної серії перетворювачів. Рішенням Держстандарту СРСР від 14.11.1979 року перетворювач ПДМ-2 було включено до Державного реєстру СРСР за номером № 97453-79.

5.1.4. Комплексний дистанційний прилад для вимірювання тиску і температури

Успішні випробування дослідних зразків ПДМ-2 на стендах і бітумних свердловинах Всесоюзного об'єднання "Татнефть" підтвердили практично перелічені вище переваги ТЕП і зумовили необхідність проведення подальшої науково-дослідницької, дослідно-конструкторської та технологічної роботи з дослідження та вдосконалення технічних характеристик приладів на основі ТЕП. У результаті роботи з розширення функціональних можливостей і поліпшення параметрів ПДМ-2 було створено комплексний дистанційний прилад для одночасного вимірювання двох параметрів ПДМТ-1.

Крім перетворення тиску в електричний сигнал, комплексний прилад ПДМТ-1 призначено також для перетворення температури. Вимірювання тиску і температури проводять водночас двома приладами.

Додаткові і розширені в порівнянні з ПДМ-2 функціональні якості ПДМТ-1:

- робочий діапазон температур манометричного перетворювача, °С 0.... +80;
- діапазон вимірюваних температур, ° С 0.... +80;
- вихідна напруга, відповідне верхньої межі вимірювання температури, мВ 80;
- максимальна нелінійність характеристики температура–вихідна напруга, % .. <1
- наведена похибка датчика температури, % ±1,5.

Підвищення експлуатаційних характеристик приладу ПДМТ-1 у порівнянні з ПДМ-2 вимагало нових схемних і конструктивних рішень. Оскільки ПДМТ-1 є комплексним приладом, необхідно було визначити оптимальний варіант перетворювача температури. Після проведених досліджень перевагу було надано перетворювачу температури, котрий використовує зміну напруги стабілізації кремнієвого стабілітрона, добре зарекомендував себе в схемі термокомпенсації. Наступним завданням було забезпечення одночасної передачі інформації про два

параметри і живлення приладу по трижильному кабелю. Крім цього, на похибку вимірювань не повинен впливати опір жил кабелю. Вирішенням завдання стало використання як інформативного параметра значення струму в провіднику кабелю (т. зв. струмовий вихід). При цьому інформація про тиск і температуру передається по двох провідниках кабелю, живлення приладу здійснюється по третьому провіднику, а оплетення кабелю слугує загальним дротом. Для реалізації струмового виходу були застосовані відповідні перетворювачі на операційних підсилювачах, що вимагало, своєю чергою, розробки двополярного блока харчування. Певній модернізації піддали також схему блока термокомпенсації.

На рис. 5.3 наведено блок-схему приладу ПДМТ-1. Тут є два незалежних перетворювачі: перетворювач тиск – струм і перетворювач температура – струм. Перетворювач тиск – струм складається з ТЕП 4 і керованого джерела струму 6. Для усунення температурної залежності вихідного сигналу перетворювача тиску ТЕП живиться від блока термокомпенсації.

2. Перетворювач температура – струм складається з датчика температури 3 і керованого джерела струму 5. Вузли 3,5 і 6 живляться від блока живлення 1. Повну принципову схему приладу і специфікацію елементів до неї наведено в [80].

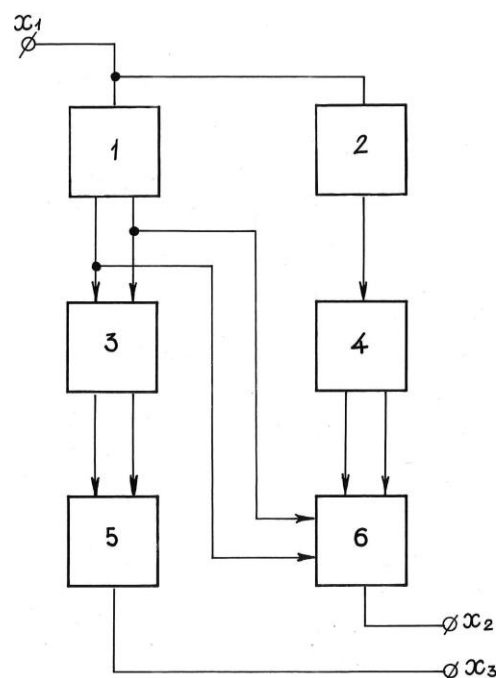


Рис. 5.3 Блок-схема комплексного приладу ПДМТ- 1

- 1 - двополярне джерело живлення
- 2 - блок термокомпенсации чутливості
- 3 - ЧЕ датчика температури
- 4 - ЧЕ датчика тиску (ТЕП)
- 5 - перетворювач температура-струм
- 6 - перетворювач тиск-струм.

Для зниження величини струму, що протікає по загальному дроту і з метою розрізнення виходів перетворювачів, напрямки вихідних струмів, що відповідають значенням двох параметрів, обрано протилежними. При цьому перетворювач тиску генерує витікаючий струм, а перетворювач температури – затікаючий. Тим самим знижується ймовірність помилкової ідентифікації вимірюваного параметра.

Оскільки в приладі ПДМТ-1 використано струмовий вихід, для реєстрації інформації про тиск і температуру необхідно використовувати прилади, що вимірюють струм. Для розширення експлуатаційних можливостей приладу, а також з метою досягнення сумісності з приладом ПДМ-2, розроблено блок сполучення, що перетворює значення струму в пропорційне значення напруги, який встановлюється в місці підключення вимірювальної апаратури. До виходу блока можна підключати як цифрові вольтметри, так і самописні потенціометри. Запобіжні діоди запобігають можливості помилкового підключення виходів перетворювачів тиску і температури до відповідних входів блока сполучення.

Загальну конструкцію комплексного приладу ПДМТ-І показано на рис. 5.4, тепловий контакт між тензоперетворювачем і термочутливими елементами блока термокомпенсації забезпечено за рахунок того, що останні зібрані в єдиний монолітний блок, який являє собою шайбу, отриману в результаті заливки цих елементів компаундом на основі епоксидної смоли ЕД-6 із теплопровідним наповнювачем, для якого використали карбід кремнію.

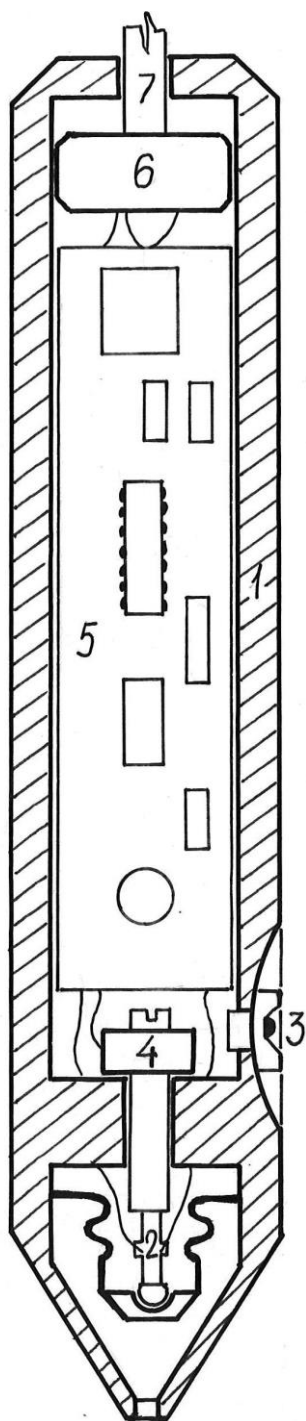


Рис. 5.4 Конструкція приладу комплексного приладу ПДМТ-1
 1 - корпус, 2 - ТЕП, 3 - датчик температури, 4 - ЧЕ блоку термокомпенсації, 5 - електронная схема, 6 - роз'єм, 7 - каротажний кабель.

Шайбу надівають на регулювальний гвинт і притискають до дна корпусу контргайкою. Чутливий елемент перетворювача температури закріплений у змінній втулці, розташованій на зовнішній поверхні приладу. На місці установки перетворювача температури в корпусі є поздовжній паз для протікання рідини. Друкована плата з електронною схемою розташована всередині корпусу приладу. Елементи підстроювання на платі розташовані так, щоб забезпечити доступ до них за надітого хвостовика. На торці хвостовика встановлено штепсельний роз'єм, що з'єднується зі спеціальною кабельною голівкою, якою закінчується каротажний кабель. Конструкція вузла чутливого елемента та інші елементи конструкції повністю ідентичні відповідним елементам у ПДМ-2.

Завдяки вжитим технічним рішенням час виходу на режим блока термокомпенсації скорочено з 20 ... 25 хв у ПДМ-2 до 3 ... 5 хв у ПДМТ-1. Час релаксації показань датчика температури склало 3 сек за практичного збігу температури вимірюваного середовища і датчика. Ці характеристики зумовлені хорошим тепловим контактом ТЕП та елементів блока термокомпенсації, малою масою, а отже, й тепловою інерцією перетворювача температури і достатньою теплоізоляцією останнього від масивних елементів конструкції.

5.1.5. Результати випробувань і застосування дослідних зразків ПДМТ-1

Два дослідні зразки приладу ПДМТ-І було виготовлено і випробувано у відділі № 25 ІАН УРСР. При випробуваннях використовували: грузопоршневий манометр МП-60, термостат U10 з точністю підтримки температури 0,1К, джерело живлення – стабілізований Б5-48, прилади комбіновані цифрові Щ4310 класу 0,5, термометр лабораторний з ціною поділки 0,1К. Нестабільність напруги живлення не перевищувала $\pm 0,05$ В, витримка під напругою перед вимірами становила 10 хв після досягнення заданої температури. Вимірювання проводили з блоком сполучення.

Основні параметри двох дослідних зразків ПДМТ-1, отримані в результаті випробувань, наведено в табл. 5.1. З таблиці видно, що характеристики перетворювача тиску і температури відповідають заданим. Вихідна напруга перетворювача тиску за відсутності тиску дорівнює 0 ... 0,2 мВ у діапазоні температур 293 ... 353К. За номінального тиску 2,5 МПа в тому самому діапазоні температур вихідна напруга перетворювача тиску дорівнює $100 \pm 0,5$ мВ.

Таблиця 5.1

№ приладу ПДМТ-1	Перетворювач температури		Перетворювач тиску		
	Основна похибка %	Варіація показників %	Основна похибка %	Варіація показників %	Нелінійність %
1	0,45	0,1	0,4	0,15	1,6
2	0,35	0,1	0,7	0,2	1,4

Вихідна напруга перетворювача температури в обох випробовуваних приладах у мілівольтах чисельно відповідає температурі вимірюваного середовища в градусах Цельсія з похибкою не більше 0,4К у всьому діапазоні. Нелінійність характеристики не перевищує зведеної похибки вимірювань.

Попередні стендові випробування дослідних зразків ПДМТ-1 було проведено в Татарському науково-дослідному і проектному інституті нафти. Випробування проходили два прилади ПДМТ-1. Випробування включали в себе:

- визначення зведеної похибки вимірювання тиску за температур 293К, 323К, 353К і температури в діапазоні 293...353К;
- визначення варіації показань;
- визначення нелінійності характеристик датчиків тиску і температури;
- визначення впливу змін напруги живлення в межах ± 2 В від номінального значення 24 В.

Всі заплановані випробування прилади успішно витримали. Необхідно відзначити, що визначені в результаті випробувань максимальні значення наведених похибок вимірювання тиску і температури дорівнюють відповідно $\pm 0,7\%$ і $\pm 0,5\%$, виявилися істотно меншими відповідних значень, наведених у Технічному завданні – $\pm 1,5\%$ для обох перетворювачів.

У висновку «ТатНИПИНефть» відзначено, що розроблені дослідні зразки приладу ПДМТ-1 надійні в роботі, здатні працювати зі стандартним обладнанням каротажних станцій і є першими комплексними приладами, призначеними спеціально для досліджень бітумних родовищ.

Крім випробувань на підприємстві «ТатНИПИНефть» один із дослідних зразків ПДМТ-1 було випробувано в Одеському відділенні Державного океанографічного інституту (ОДОГОІН). У Висновках ОДОГОІН відзначено, що дані вимірювань приладу ПДМТ-1 відповідають його технічним характеристикам, які практично повністю задовольняють вимоги гідрофізичних досліджень. У порівнянні з приладами типу ДТМ-25 і ТСП-365м-01, які використовувались на той час, прилад ПДМТ-1 мав такі переваги: компактний,

надійний в роботі, зручний в експлуатації, не вимагає спеціальної вторинної апаратури. За попередньою оцінкою очікуваний економічний ефект від використання ПДМТ-1 в ОДОГОІН мав скласти 4 500 руб на один прилад.

5.2. Застосування ТЕП в інших розробках

Таким чином, розроблений прилад можна викоритовувати не тільки для дослідження бітумних родовищ, але й для проведення гідрофізичних досліджень океану, на підприємствах нафтової і газової промисловості і в інших галузях народного господарства в складі автоматизованих систем, для яких такі якості приладу, як широкий діапазон робочих температур і дистанційність (сягає 6 км), мають вирішальне значення.

Оригінальні технічні рішення, застосовані в розробці, забезпечують параметри приладу ПДМТ-1, що знаходяться на сьогодні на рівні кращих вітчизняних аналогів.

Перелічені переваги ТЕП і успіх розробки на їхній основі приладів типу ПДМ-2 і ПДМТ-1 стимулювали подальше опрацювання як конструкції ТЕП, так і приладів на їхній основі. У результаті було виготовлено кілька дослідних зразків різних приладів.

Для контролю за проведенням процесу точкового зварювання в ІЕЗ АН УРСР ім. Є. О. Патона було виготовлено дистанційний манометр на діапазон тисків 0...0,5 МПа з номінальним вихідним сигналом 1 В [72]. Зміна номінального діапазону тисків призвела до конструктивних змін вузла чутливого елемента і корпусу приладу. Як трансформатор всебічного гідростатичного тиску з одноосьовою деформацією ТЕП тут також використано сильфон, однак його ефективний перетин збільшено до 7,5 см. Оскільки необхідну номінальну вихідну напругу приладу складає 1 В, було розроблено схему підсилювача

вихідного сигналу ТЕП. Остання збирається на одній платі зі схемою термокомпенсації і забезпечує вихідний сигнал $1,0 + 0,02 \text{ В}$ за номінального тиску в діапазоні $233 \dots 333 \text{ К}$. Схемне рішення з додатковим операційним підсилювачем в колі зворотного зв'язку забезпечує повну симетричність схеми по ланцюгах входів і зворотного зв'язку і дає можливість отримати мінімальний дрейф нуля вихідного сигналу, мінімальний вплив вхідних струмів основного ОУ на основну наведену похибку і придушення синфазного вхідного сигналу близько 90 дБ. Таким чином, результуючий клас точності приладу визначається метрологічними параметрами тензоперетворювача.

5.2.1 Електронні ваги – експериментальні зразки

Описані в розділі 1 конструктивні варіанти ТЕП типу «Куб» було випробувано як первинні перетворювачі в кількох конфігураціях електронних ваг. Кубічна форма перетворювачів забезпечує їм достатню стійкість при прикладанні навантаження і підвищену перевантажувальну здатність по зусиллю.

Перша модель (рис. 5.5) являє собою шток із платформою, закріплений в обоймі, всередині якої знаходиться ТЕП. Обойма передає на перетворювач вагу вантажів і елементів конструкції. Перетворювач закріплений на кронштейні, що входить в обойму. Верхню опору перетворювача виконано сферичною, а нижню – плоскою з виступом. Це зроблено для фіксації нижньої межі ТЕП на кронштейні і вільної підвіски обойми над верхньою гранню.

Володіючи чутливістю близько 10^{-6} від повного діапазону навантаження, описана конструкція має низку недоліків, таких як громіздкість, необхідність у вертикальній несучій

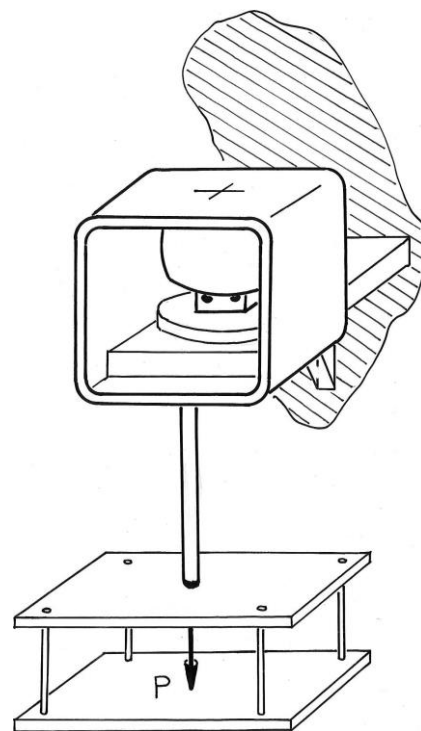


Рис. 5.5 Конструкція електронних вагів з використанням одного ТЕП

поверхні для монтажу, високу механічну добротність системи, яка зумовлює великий час заспокоєння за динамічних впливів.

Від цих недоліків є вільною модель ваг із використанням кількох ТЕП (рис. 5.6). Ваги цієї конструкції являють собою платформу, на якій встановлено три або чотири ТЕП. Кожен ТЕП подібний до використаного в попередній моделі ваг.

На встановлені ТЕП покладено зверху другу платформу з відповідними заглибленнями знизу, на яку кладуть вантажі. У разі використання чотирьох ТЕП нижні і / або верхні опори виконуються з амортизаційними прокладками для компенсації можливого розкиду перетворювачів по висоті.

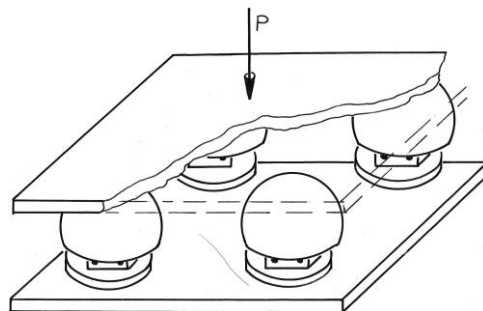


Рис. 5.6 Конструкція електронних ваг з використанням декількох ТЕП

Вихідний сигнал, який є мірою навантаження, виходить у результаті підсумовування сигналів чотирьох перетворювачів. Практична відсутність рухомих деталей і простота конструкції є незаперечними перевагами ваг.

Недоліки – це необхідність боротьби з температурним дрейфом чутливості кожного перетворювача і високі вимоги до лінійності характеристики перетворення сила – вихідна напруга. Перше завдання можна вирішувати за допомогою елементів термокомпенсації або термостатування окремих перетворювачів або конструкції в цілому. У цьому сенсі конструкція з одним перетворювачем має перевагу

5.2.2. Компенсація нелінійності навантажувальної характеристики ТЕП

Як зазначалося в 2.6, низка причин зумовлює нелінійність навантажувальних характеристик ТЕП. Якщо для цілої низки застосувань

похибки, що вносяться нелінійністю, є цілком припустимими, то в деяких випадках вони неприйнятні. Наприклад, у конструкції ваг з підсумовуванням вихідних сигналів від кількох перетворювачів нелінійність навантажувальних характеристик останніх призводить до появи додаткової похибки за позаосьового додавання навантаження до платформи і не дозволяє реалізувати потенційно високу точність перетворення. Нижче розглянуто два практично випробуваних методи компенсації нелінійності.

У розробленому для дистанційного приладу ПДМ-2 компенсаторі використано можливість зменшення коефіцієнта нелінійності орієнтовно в два рази за допомогою зовнішнього нелінійного елемента, включеного паралельно вихідним клемам перетворювача безпосередньо поруч з вимірювальним пристроєм. Як такий нелінійний елемент використано германієвий діод, включений в прохідному напрямку. З метою стабілізації та оптимізації залежності опору діода від напруги в діапазоні 0 ... 100 мВ корпус діода є керованим за допомогою терморегулятора і за допомогою схеми, яка подібна до наведеної в [52]. При цьому корпус діода типу ГД402А закріплено з нагрівачим транзистором і терморезистором на загальному радіаторі. Нестабільність підтримки температури не перевищувала 0,1К. Оптимальну температуру вибирали, виходячи з умови максимальної компенсації нелінійності навантажувальної характеристики перетворювача і вона виявилася такою, що дорівнює $315 \pm 0,5\text{K}$.

На рис 5.7 показано залежності коефіцієнта нелінійності K_n від тиску на вході перетворювача за відключеного компенсатора нелінійності (крива 1) і за включеного (крива 2). Видно, що в діапазоні тисків 0 ... 1 МПа

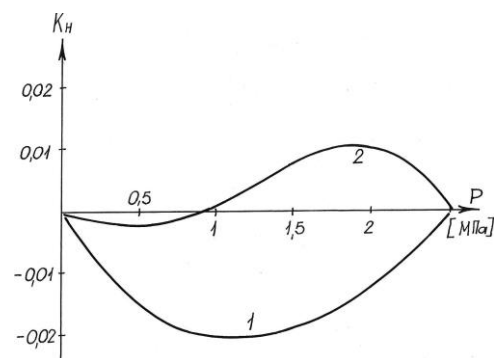


Рис. 5.7 Компенсація нелінійності характеристики перетворення ТЕП за допомогою шунтування вихідного сигналу нелінійним елементом

наявна практично повна компенсація нелінійності в діапазоні 1 ... 2,5 МПа та спостерігається деяка перекомпенсація, пов'язана з неповною відповідністю навантажувальної характеристики ТЕП характеристиці діода. Проте при використанні компенсатора максимальне абсолютне значення коефіцієнта нелінійності зменшилася в два рази. Для того щоб вихідний сигнал перетворювача, включеного спільно зі схемою компенсатора нелінійності, дорівнював 100 мВ за 2,5 МПа, його встановлювали таким, що дорівнює 109 мВ за відключеного компенсуючого діода.

Один такий компенсатор можна використати для компенсації нелінійності характеристик кількох водночас працюючих перетворювачів. У цьому випадку для кожного приладу є необхідним свій діод.

Значно більшу ефективність та універсальність має метод компенсації з використанням зворотного зв'язку по напрузі. Принцип компенсації засновано на зміні напруги живлення ТЕП при його навантаженні в залежності від вихідного

сигналу. Оптимальна компенсація досягається підбором коефіцієнта зворотного зв'язку. При цьому мінімально досягне значення залишкової нелінійності характеризується величиною γ^2 , де γ – вихідна нелінійність.

Приведені міркування відносяться до аналогових методів компенсації нелінійності. У сучасних приладах компенсація здійснюється в цифровій області за допомогою мікропроцесорів. Остання відкриває ширші можливості, включаючи калібрування і нормування параметрів вторинного

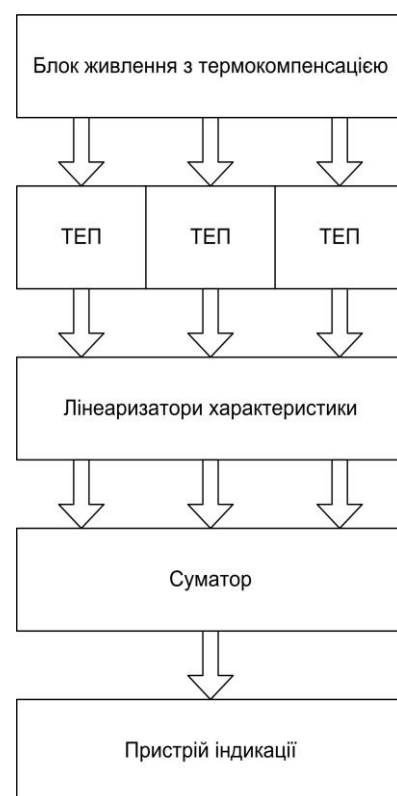


Рис. 5.8 Блок-схема вторинного перетворювача електронних вагів з використанням трьох ТЕП

перетворювача.

Блок-схему вторинного перетворювача електронних ваг з розглянутим компенсатором нелінійності наведено на рис. 5.8. Тут використано термокомпенсацію за допомогою одного резистора [22]. Після лінеаризації сигнали трьох перетворювачів складаються на суматорі. Похибка перетворення, досягнута на такому експериментальному зразку, склала 0,25% в діапазоні температур 288...303К.

ВИСНОВКИ ДО П'ЯТОГО РОЗДІЛУ

1. Застосування твердотільних перетворювачів сили на основі ефекту тензо-е.р.с. у дистанційному перетворювачі тиску забезпечило високі метрологічні характеристики останнього, зокрема, адитивна складова вихідного сигналу в діапазоні 273...353K не перевищує 0,5% від величини номінального сигналу.
2. Запропонований спосіб і пристрій температурної компенсації зміни чутливості перетворювача забезпечили високу ефективність роботи ТЕП у наведеному діапазоні температур із похибкою не гірше 1%.
3. Результати випробувань розроблених приладів підтверджують перспективність використаних принципів для подальших розробок як дискретних, так і інтегральних перетворювачів механічних величин на основі ТЕП.
4. Кращі з отриманих параметрів різних перетворювачів на основі ТЕП, зокрема значення варіації показань близько 0,2% і точність температурної компенсації краще 0,5%, дають підставу припустити, що при використанні останніх як первинних перетворювачів стає можливим створення приладів для вимірювання механічних величин класу точності 0,25% і вище з широким діапазоном робочих температур.

ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень з вивчення та використання у приладах поперечних ефектів у германії і кремнії отримано наступні результати.

Детально досліджено характеристики нелінійності ефекту тензо-е.р.с. у кристалах кремнію і германію в широкому діапазоні концентрацій $4 \cdot 10^{19} \dots 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, що дозволило удосконалити лінійну модель ефекту тензо-е.р.с. введенням апроксимуючого полінома. Отримано характеристики початкової чутливості, нелінійності характеристики, температурної залежності чутливості. Запропоновано заходи для мінімізації похибок ТЕП. Досліджено вплив кристалографічної орієнтації зразка на параметри ТЕП. Показано, що мінімальне значення нелінійності характеристики досягається в ТЕП, що працюють у режимі одноосового стиску, за орієнтації зразка n-типу в площині (110). Пропоновано оригінальну конфігурацію ТЕП, що не вимагає додаткових елементів кріплення і пружних елементів перетворювача.

На основі дослідження та аналізу джерел похибок інтегральних перетворювачів тиску проведено комплексну оптимізацію принципу роботи первинного перетворювача, топології чутливого елемента, конструкції і способу збирання інтегрального перетворювача тиску. Використання в останньому ТЕП в МЕМС-виконанні дозволило запропонувати ППТ зі зниженою в 5 ... 15 разів у порівнянні з аналогами адитивної похибки вихідного сигналу, придатного для загальнотехнічного застосування у діапазоні температур 233 ... 393K.

Показано перспективність використання перетворювачів на основі ефекту тензо-е.р.с. як у дискретно, так і в інтегральному виконанні для створення датчиків сили і тиску, що працюють у широкому діапазоні температур.

За результатами досліджень ТЕП розроблено дистанційний перетворювач тиску ПДМ-2. Низка використаних у ПДМ-2 оригінальних технічних рішень, у

тому числі авторське свідоцтво на пристрій для вимірювання сил, забезпечили досягнення точності перетворення не гірше 1,5% у діапазоні температур 273 ... 353К. ПДМ-2 успішно пройшов Державні випробування і його рекомендовано до серійного випуску. В результаті удосконалення ПДМ-2 розроблено комплексний дистанційний вимірювач двох параметрів – тиску і температури – ПДМТ-1.

Досліджено низку концентраційних ефектів в германії і запропоновано перетворювачі оригінальної конструкції. Диференціальний тензотранзистор, що використовує ефект електричного пінча, володіє вихідним сигналом близько кількох вольт і лінійною, аж до 150 МПа, характеристикою. Безконтактний лінійний датчик переміщень на основі магнітоконцентраційного ефекту характеризується чутливістю 3,5 мВ / мм за роздільної здатності близько 5 мкм і розширеного до $\pm 1,8$ мм діапазону лінійного перетворення. Порогові перетворювачі кута повороту і сили на основі осцилаторного ефекту характеризуються протяжністю схилу характеристики близько 10% від порогових значень критичних кута і сили, відповідно, і дають можливість управління порогом.

Проведені дослідження підтверджують перспективність практичного використання поперечних ефектів у багатодолинних напівпровідниках для створення перетворювачів механічних величин. Зокрема, на основі ефекту тензо-е.р.с. є можливим створення мініатюрних перетворювачів тиску і сили підвищеного до 0,5% класу точності, здатних працювати в широкому діапазоні температур, наприклад, 233...393К. Крім цього, видаються перспективними подальші дослідження поперечних концентраційних ефектів із метою створення на їхній основі різних перетворювачів механічних величин із вихідним сигналом, що сягає кількох вольт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Barlian A.A., Park W-T., Mallon J.R. Jr, Rastegar A.J., Pruitt B.L. Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems // Proc IEEE Inst Electr. Electron Eng. 2009; 97(3): 513–552. doi:10.1109/JPROC. 2009.2013612
2. Авт. свідет. N9398847. Полупроводниковый тензочувствительный переключатель. / К. К. Валацка, И.В. Мачюшайтис, П.П. Мишкинис. – Оpubл. 27.09.73, Бюллетень ОИПОТЗ "38.
3. Авт. свид. № 401291. Тензодатчик. / И.П. Жадько, В.А. Романов, Б.К. Сердега. – Оpubл. 22.02.77, Бюллетень ОИПОТЗ N7.
4. Авт. свид. № 907406. Устройство для измерения сил. / И.П. Жадько, И.В. Михайленко, В.А. Романов – Оpubл. 23.02.82, Бюллетень ОИПОТЗ № 7.
5. Авт. свид. № 455634. Датчик давления. / А.Ю. Матуленис, Ю.К. Пожела, Б.В. Царенков и др. – Оpubл. 25.12.74, Бюллетень ОИПОТЗ № 48.
6. Аллен Р. Крестообразный датчик давления // Электроника. – 1980. – № 21. – С. 9–10.
7. Аллен Р. Новые области применения кремниевых полупроводниковых датчиков // Электроника. – 1980. – № 24. – С. 28–41.
8. Анизотропия осцилляторного эффекта в многодолинных полупроводниках кубической симметрии. / И.И. Бойко, А.В. Буянов, И.В. Михайленко и др. // Украинский физический журнал. – 1984. – Т. 29. – № 8. – С. 1230–1236.
9. Анизотропия электрических и фотоэлектрических свойств InSb. / И.П. Жадько, Э.И. Рашба, В.А. Романов и др. // Физика твердого тела. – 1965. – Т. 7. – С. 1777–1782.
10. Баранский П.И., Ключков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника: Справочник. – К.: Наукова думка. – 1975. – 704 с.
11. Баранский П.И., Коломоец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации

относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в *n*-германии // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10. – Вып. 11. – С. 2179–2186.

12. Баранский П.И., Колomoец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в *n*-кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1979. – Т. 13. – Вып. 4. – С. 815–818.

13. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. – М.: Наука. – 1972. – 583 с.

14. Бойко И.И. Четный гальваномагнитоконцентрационный эффект в полупроводниках с биполярной проводимостью // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11. – Вып. 7 – С. 1266–1271.

15. Бойко И.И., Романов В.А. Электрические и фотоэлектрические свойства полупроводников с анизотропной проводимостью // Физика и техника полупроводников. – 1977. – Т. 11. – № 5. – С. 817–833.

16. Будур С.М., Решетило А.П., Усатюк Е.В. Технология получения тонких мембран кремниевых интегральных датчиков давления // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры. – 1984. – Вып. 2 (49). – С. 55–61.

17. Буянов А.В., Михайленко И.В. Преобразователь перемещения на основе магнитоконцентрационного эффекта // Приборы и системы управления. – 1985, № 3. – С. 27–28.

18. Буянов А.В., Михайленко И.В. Магнитоконцентрационный датчик положения // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, Арм. ССР. – 1985. – С. 22–24.

19. Ваганов В.И. Основные тенденции развития микроэлектронных полупроводниковых датчиков // Материалы семинара "Датчики на основе технологии микроэлектроники". – М. – 1983. – С. 3–4.

20. Ваганов В.И., Немчинов В.М. Основные направления применения микропроцессоров с датчиками // Материалы семинара "Датчики на основе технологии микроэлектроники". – М. – 1983. – С. 33–37.
21. Ваганов В.И., Белов Н.С., Плохова Т.С. Машинное моделирование процесса локального анизотропного травления кремния для решения задач формообразования. // материалы семинара "Датчики на основе технологии микроэлектроники". – М. – 1983. – С. 42–47.
22. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 136 с.
23. Ваганов В.И., Гончарова Н.И. Оптимальные режимы анизотропного травления кремния в водных растворах щелочей // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 1980. – Вып. 1 (85).
24. Ваганов В.И., Поливанов П.П. // Электронная техника. Серия 11. – 1975. Вып. 4. – С. 93–98.
25. Ваганов В.И., Гончарова Н.И., Случак И.И. Интегральный тензорезисторный преобразователь с профилированной мембраной // Тезисы докладов 7-ой Всесоюзной конференции "Тензометрия-83". – Свердловск. – 1983. – С. 141–143.
26. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. – М.: Сов. радио. – 1975. – 105 с.
27. Викулина Л.Ф., Козел В.В. Чувствительность двухколлекторных магнитотранзисторов // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30. – № 4. – С. 824–826.
28. Возникновение токовых колебаний в осцилляторе / И.М. Викулин, Л.Л. Люзе, В.А. Преснов, Н.С. Михачева // Физика и техника полупроводников. – 1967. – Т.1. – Вып.10. – С.1462–1465.

29. Владимиров В.В. Винтовая неустойчивость в электроннодырочной плазме полупроводников // Украинский физический журнал. – 1975. – Т.115. – Вып.1. – С.73–99.
30. Владимиров В.В., Волков Е.Ф., Мейлихов Е.З. Плазма полупроводников. – М.: Атомиздат. – 1979. – 251 с.
31. Влияние многодолинной структуры зоны проводимости на винтовую неустойчивость в электронно-дырочной плазме кремния. / В.М. Бондар, В.В. Владимиров, Н.И. Кононенко и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1973. – Т. 65. – Вып. 3. – С. 1093–1099.
32. Влияние одноосного сжатия и растяжения кристаллов на критерий возбуждения винтовой неустойчивости в электронно-дырочной плазме германия и кремния. / В. М. Бондар, В. В. Владимиров, Н. И. Кононенко, А. И. Щедрин // Физика твердого тела. – 1975. – Т.17. – Вып. 2. – С. 445–448.
33. Влияние разогрева электронов на винтовую неустойчивость в многодолинных полупроводниках. / В.М. Бондар, В.В. Владимиров, Н.И. Кононенко, А.И. Щедрин // ДАН СССР. – 1975. – Т. 223. – № 2. – С. 322–324.
34. Влияние междолинного перезаселения электронов на частоту осциллятора в кремнии и германии. / В.М. Бондар, В. В. Владимиров, В.П. Доскоч и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1975. – Т. 69. – Вып. 6. – С. 2187–2189.
35. Влияние междолинного перезаселения электронов и температуры кристалла на возбуждение винтовой неустойчивости в электронно-дырочной плазме германия в сильных магнитных полях. / В.М. Бондар, В.В. Владимиров, В.П. Доскоч и др. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1977. – Т.72. – Вып. 6. – С. 2160–2166.
36. Возникновение неравновесных носителей при прохождении тока через упруго деформированный германий. / И.И. Бойко, И.П. Жадько, Э.И. Рашба, В.А. Романов // Физика твердого тела. – 1965. – Т.7. – Вып.7. – С. 2239–2242.

37. Высокоскоростной тензорезисторный преобразователь линейных перемещений контактного типа. // Экспресс-информация "Контрольно-измерительная техника". – 1986. – № 13. – С. 14.
38. Вяткин А.П. Тензоэлектрические явления в арсенид-галлиевых структурах. // Известия вузов. Физика. – Изд-во Томского университета. – 1980. – №1. – С.91–94.
39. Гертатый И.А. Магнитоконцентрационный эффект в полупроводниковых образцах конечной длины // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т.18. – №1. – С.54–62.
40. Гош Дж. Вырезанные из кремния миниатюрные компоненты в качестве датчиков и клапанов // Электроника. – 1984. – Т.57. – №10. – С.16–17.
41. Гридчин В.А., Бердинский А.С. Сравнение эффективности некоторых схем температурной компенсации // Физика и техника полупроводников. Сборник научных трудов / МВ и ССО РСФСР. НГУ НЭТИ. – Новосибирск. – 1974.
42. Гридчин В.А., Кальпус В.Ю. О проектировании кремниевых тензочувствительных элементов мембранного типа на поперечной пьезоэдс // Электронное и полупроводниковое приборостроение. Межвузовский сборник научных трудов под ред. В. С. Шадрина / МВ и ССО РСФСР; НГУ НЭТИ. – Новосибирск. – 1977.
43. Гридчин В.А., Круглов В.В. Интегральный тензопреобразователь на поперечной тензоэдс // Физика и техника полупроводников. Сборник научных трудов /МВ и ССО РСФСР, НГУ НЭТИ. – Новосибирск. – 1976.
44. Гридчин В.А., Пирогова Р.А. Метрологические характеристики тензопреобразователей на поперечной пьезо-эдс // Измерительная техника. – 1985. – № 11. – С. 40–42.
45. Гуга К.Ю., Малютенко В.К. Четный магнитоконцентрационный эффект в антимониде индия // Письма в Журнал теоретической физики. – 1977. – Т.3. – Вып.15. – С.730–732.

46. Дифференциальный тензотранзистор. / И.П. Жадько, И.В. Михайленко, В.А. Романов, Б.К. Сердега // Приборы и системы управления. – 1987. – №5. – С.26.
47. Жадько И.П., Романов В.А., Сердега Б.К. Полупроводниковый тензопреобразователь. // Приборы и техника эксперимента. – 1972. – №5. – С.215–216.
48. Ильинская Л.С., Подмарьков А.Н. Полупроводниковые тензодатчики. – М.–Л.: Энергия. –1966. – 118 с.
49. Исследование преобразователя статических перемещений, работающего на основе гальваномагниторекомбинационного эффекта / И.И. Виленчикас, И.С. Левитас, Ю.К. Пожела, З.П. Харлушас // Станкостроение Литвы. – 1972. – Т.5. – Вильнюс: Минтис. – С.141–144.
50. Козеев Е.В., Макаров Е.А. Поперечная пьезоэдс в кубических кристаллах. // Физика и техника полупроводников. Сборник научных трудов. – МВ и ССО РСФСР. НТУ НЭТИ. – Новосибирск. – 1968.
51. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.А., Фаттахов Ю.М. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь. – 1982. – 240 с.
52. Кучинский П.В., Ломако В.М. Стабилизатор температуры для области 77–340К // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – №4. – С.261–262.
53. Лазерно-стимулированное травление в технологии интегральных схем. // Зарубежная электронная техника. – 1986. – № 6. – С. 3–56.
54. Магниточувствительные элементы / Г.В. Абгарян, Г.А. Егиазарян, Г.А. Мнацаканян, А.С. Саркисян // Электронная промышленность. – 1986. – № 2. – С. 35–36.
55. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. – М.: Мир. – 1967. – 477 с.
56. Микросхема, содержащая датчики температуры и давления: Рекламное сообщение // Электроника. – 1983. – Т. 56. – № 16. – С. 96.

57. Некоторые особенности пьезочувствительных транзисторов. / Т.Н. Анашкина, Г.Б. Романова, Л.Н. Свиркин, Н.Н. Феокистова // Полупроводниковая тензометрия. Труды 3-го сов-я. Кн. 2. – Новосибирск. – 1968.
58. Николаева В.А., Курьяков Б.И. Технология изготовления и расчет мембран интегральных тензопреобразователей // Электронная техника. Сер.10: Микроэлектронные устройства. – 1980. – Вып. 4(22).
59. Новости зарубежной электронной техники. – 1971. – № 17. – С. 16.
60. Основные физические принципы и характеристики новых магнитных полупроводниковых измерительных преобразователей //Экспресс-информация. "Контрольно-измерительная техника". – 1984. – № 44. – С. 22–29.
61. Панкратова К.К. Тензотермоэлектрические свойства n -Ge в области смешанной проводимости: дис... канд. физ.-мат. н. – Черновцы. – 1976. – 162 с.
62. Пелевин К.В., Полячек Г.П. Внутренние напряжения в тонких монокристаллических кремниевых пленках // Электронная техника. Серия 10: Микроэлектронные устройства. – 1983. – Вып. 5(41). – С. 39–44.
63. Пелевин К.В., Тихонюк В.И. Исследование механической прочности кремниевых мембран к критическим воздействиям //Электронная техника. Серия 10: Микроэлектронные устройства. – 1984. – Вып. 5(53). – С. 35–38.
64. Пелевин К.В., Тихонюк В.И., Петрович В.В. Технологические особенности получения тонких полупроводниковых мембран с высокой однородностью по толщине» // Электронная техника. Серия 10: Микроэлектронные устройства. – 1981. – Вып. 1(25). – С. 46–52.
65. Первичные измерительные преобразователи на выставке СЕНСОР–85. // Экспресс-информация "Контрольно-измерительная техника". – 1985. – № 26. – С. 4–6.
66. Петерсен К.Э. Кремний как механический материал // ТИИЭР. – 1982. – Т.70. – № 5. – С. 5–49.

67. Пикус Г.Е. Термо- и гальваномагнитные эффекты в полупроводниках при учете изменения концентрации носителей тока // Журнал теоретической физики. – 1956. – Т. 26. – Вып. 1. – С. 23–50.
68. Пожела О.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. – М.: Наука, 1977. – 364 с.
69. Поливанов П.П. Анизотропия скорости растворения кристаллов кремния при локальном травлении // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 1977. – Вып. 5(71).
70. Поливанов П.П. Кремниевый мембранный чувствительный элемент с двойной оправой // Приборы и системы управления. – 1979. – № 7. – С. 30.
71. Полупроводниковая тензометрия: материалы 1-ой конференции по полупроводниковой тензометрии. – Львов, 1970. – 374 с.
72. Полупроводниковые дистанционные манометры. / И.П. Жадько, И.В. Михайленко, В.А. Романов и др. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Республиканский межведомственный сборник. – К.: Наукова думка. – 1981. – Вып. 34. – С. 71–75.
73. Полупроводниковые измерительные преобразователи // Экспресс-информация "Контрольно-измерительная техника". – 1986. – № 22. – С. 7–11.
74. Полупроводниковые преобразователи. / под ред. Ю. Пожелы. – Вильнюс: Мокслас. – 1980. – С. 141–170.
75. Полупроводниковые приборы в измерительной технике: сб. статей / под ред. М.А. Земельмана. – М.–Л.: Энергия. – 1964. – С. 188–197.
76. Полупроводниковые тензодатчики / под ред. М. Дина. – М.–Л.: Энергия. – 1965. – 215 с.
77. Полупроводниковые тензопреобразователи давления и силы на основе гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире". / А.В. Белоглазов, В.М. Стучебников, В.В. Хасиков и др. // Приборы и системы управления. – 1982. – № 5. – С. 21–27.

78. Полупроводниковый дистанционный манометр ПДМ-2. / В.А. Романов, И.П. Жадько, И.В. Михайленко и др. // Тезисы седьмого Всесоюзного семинара по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации. – М., 1981. – 98 с.
79. Полупроводниковый дистанционный манометр ПДМ-2: Информационный листок / ИП АН УССР. – К.: Наукова думка. – 1975. – 4 с.
80. Полупроводниковый преобразователь давления и температуры / В.А. Романов, И.В. Михайленко, Л.В. Святогор, В.Ф. Кондрашкин // Приборы и системы управления. – 1983. – № 10. – С. 22–23.
81. Прецизионные датчики давления // Электроника. – 1985. – Т. 58. – № 3. – С. 31–40.
82. Разработать комплексный дистанционный полупроводниковый прибор для измерения давления и температуры и передать для внедрения на предприятия нефтяной промышленности СССР: Отчет о НИР (окончательный) / Институт полупроводников АН УССР. Руков. Романов В.А. Номер Государственной регистрации 80069543 (Постановление ГКНТ СССР 1994 от 13.03.80 г. Шифр темы 1. 3. 7. 4). – К., 1982. – 34 с.
83. Рашба Э.И. Особенности прохождения электрического тока через собственный анизотропный полупроводник // Физика твердого тела. – 1964. – Т. 6. – С. 3247–3250.
84. Розов В.В., Соболева В.М. Сплавы для полупроводниковых приборов. – М.: Металлургия. – 271с.
85. Свиридов И.Ф. Влияние гидростатического давления на вольт-амперные характеристики туннельных диодов из арсенида галлия // Известия АН Арм. ССР. Физика. – 1985. – Т. 20. – № 5. – С. 293–295.
86. Состояние и перспективы развития электротензометрии: тезисы докладов / Всесоюзная научно-техническая конференция. – Ленинград. – 1973. – 76 с.

87. Стадии формирования границы раздела кремния с термическим окислом. / В.В. Монахов, О.В. Романов, С.Н. Кириллов и др. // Физика и техника полупроводников. – 1986. – Т. 20. – № 3. – С. 477–480.
88. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Советское радио. – 1980. – 424 с.
89. Стучебников В.М. Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" // Измерения, контроль, автоматизация. – 1982. – № 4(44). – С. 15–26.
90. Стучебников В.М. Полупроводниковые интегральные тензорезисторные преобразователи механических величин // Измерения, контроль, автоматизация, 1983. – № 1(45). – С. 30–42.
91. Стучебников В.М. Интегральные полупроводниковые чувствительные элементы тензопреобразователей механических величин // Приборы и системы управления. – 1986. – № 4. – С. 20–23.
92. Стучебников В.М., Суханов В.И. Оптимизация характеристик высокотемпературных тензопреобразователей на основе структур КНС // Материалы семинара "Датчики на основе технологии микроэлектроники". – М. – 1983. – С. 47–51.
93. Стучебников В.М., Суханов В.И., Хасиков В.В. Тензорезисторные чувствительные элементы на основе структур "кремний на сапфире" // Приборы и системы управления. – 1981. – № 3. – С. 23–24.
94. Телемеханические датчики давления // Экспресс-информация "Приборы и элементы автоматики и вычислительной техники". – 1984. – № 47. – С. 1–11.
95. Тензодатчики на основе осцилляторного эффекта. / В.М. Бондар, В.В. Владимиров, В.П. Доскоч, А.И. Щедрин // Приборы и техника эксперимента. – 1981. – № 3. – С. 244–246.

96. Тензодиодный эффект при изгибе длинных полупроводниковых диодов-пластин. / З.С. Грибников, И.П. Жадько, В.А. Романов, Б.К. Сердега // Украинский физический журнал. – 1970. – Т.15. – № 2. – С. 303–317.
97. Трухачев Б.С., Заседателев С.Н. Полупроводниковые датчики механических величин на современном этапе. // Приборы и системы управления. – 1981. – № 1. – С. 15–18.
98. Трухачев В.О., Удалов Н.П. Полупроводниковые тензопреобразователи. – М.: Энергия. – 1968. – 79 с.
99. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. – К.: Наукова думка. – 1983. – 304 с.
100. Управляемый магнитным полем сигнализатор давления. / А.В. Буянов, И.П. Жадько, И.В. Михайленко и др. // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, Арм. ССР. 1985. – С. 31–32.
101. Физическая акустика. / под ред. У. Мэзона, Т. 1. ч. Б (Методы и приборы ультразвуковых исследований). – М.: Мир. – 1967. – С. 139–187.
102. Флорис Н. Простой метод осуществления электрического контакта с кремнием // Приборы для научных исследований. – 1964. – Т. 36. – С.116–117.
103. Четный магнитоконцентрационный эффект в многодолинных полупроводниках. / И.И. Бойко, А.В. Буянов, И.П. Жадько и др. // Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т.17. – Вып.6. – С.1049–1053.
104. Чунг Н.У. Изготовление тонких монокристаллических кремниевых окон большой площади // Приборы для научных исследований. – 1980. – Т. 51. – № 9. – С. 1212–1216.
105. Шмарцев Ю.В., Мирзобаев М. Пьезо-аналог эффекта Холла в германии п-типа // Физика и техника полупроводников. – 1971. – Т.5. – Вып.11. – С.2245–2249.

106. Шукшунов В.Е., Марксон А.В. Исследование термочувствительных элементов на базе полупроводниковых стабилитронов // Труды Новочеркасского политехнического института. – Новочеркасск. – 1968. – 79 с.
107. Элексион М. Внедрение технологии ИС в производство датчиков // Электроника. – 1986. – Т. 59. – № 11. – С. 49–56.
108. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках. / под общ. ред. П.И. Баранского. – К.: Наукова думка. – 1977. – 269 с.
109. Электронные датчики //Экспресс-информация "Испытательные приборы и стенды". – 1984. – № 6. – С. 1–8.
110. Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензодатчиками. – М.: Мир. – 1974. – 196 с.
111. Яковлев О.В. Упругий элемент интегрального измерительного преобразователя малых давлений. /Материалы семинара "Датчики на основе технологии микроэлектроники". – М. – 1983. – С. 6–71.
112. Avilov V.V., Arkhipov R.G. Pressure indicator in. elastic and plastic media // Solid State Communications. – 1983. – v. 48. – No.10. – P. 933–935.
113. Boiko I.I., Zhadko I.P., Romanov W.A. Electrical pinch in intrinsic elastically bent germanium // Physica Status Solidi. – 1969. – v. 34. – No. 2. – P. 461–468.
114. Board K. New unorthodox semiconductor devices // Reports on progress in physics. – 1985. – v. 48. – No12. – P.1595–1637.
115. Borney J.M., Wise K.D. Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1979. – v. ED– 26. – No12. – P. 1906–1910.
116. Broeks A.D., Donovan R.P., Hardesty C.A. Low-temperature electrostatic silicon-to-silicon seals using sputtered borosilicate glass // Journal of Electrochemical Society. – 1972. – v.119. – No. 4. –P. 545–546.

117. Brooks H. Theory of the electrical properties of Ge and Si // *Advances in Electronics and Electrophysics*. – 1955. – v. 7. – P. 87–185.
118. Bryzen J. Approaching performance limits in silicon piezoresistive pressure sensors // *Sensors and Actuators*. – 1983. – No. 4. – P. 669–678.
119. Chattopadhyay D. Piezoelectric and deformation potential acoustic scattering mobility of a two-dimensional electron gas in quantum wells. // *Physica Status Solidi (b)*. – 1986. – v. 135. – No.1. – P. 409–413.
120. Chip senses heat, pressure. // *Electronics*. – 1986, v. 56, No16. – P. 159–160.
121. Electrical pinch, in elastically deformed germanium / Rashba E. I., Romanov V.A., Boiko. I.I., Zhadko I.P. // *Physica Status Solidi (b)*. – 1966. – v. 16. – No.1. – P.43–56.
122. Fomash. S.J. Advances in dry etching process – A review. // *Solid State Technology*. –1985. – v. 28. – No11. – P.150–165.
125. Geyling F.T., Forst J.J. Semiconductor strain transducers. // *Bell System Technical Journal*. – 1960, v.39. – No.3. – P.705–731.
124. Glicsman M. Plasmas in solids // *Solid State Physics*. – 1971. – No.26. – P.275–420.
125. Gribnicov Z.S., Lomova W.A., Romanov W.A. Injection of current carriers in anisotropic semiconductor plates and the magnetodiode effect // *Physica Status Solidi (b)*. – 1968. – v. 28. – No 2. – P. 815–825.
126. Herring C. Transport properties of a many-valley semiconductors // *Bell System. Technical Journal*. – 1955. – v. 34. – P. 237–290.
127. Kim S.-C., Wise K.D. Temperature sensitivity in silicon piezoresistive pressure transducers // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1985. – v. – ED-50, No. 7. – P. 801–810.
128. Ko W.H., Hyncek J., Beetteler S.F. Development of a miniature pressure transducer for biomedical applications // *IEEE Transactions of Electron Devices*. – 1979. – v. ED-26, No12. – P.1896–905.

129. Krank W., Schaller U., Herman R. Sensitive pressure gauge on the basis of pure n-InSb // *Physica Status Solidi*. – 1984. – v. 85a. – No2. – P. – 183–187.
130. Lee D.B. Anisotropic etching of silicon // *Journal of Applied Physics*. – 1969, v. 40. – No11. – P. 4569–4574.
131. Madelung O., Tewerdt L., Welker H. Zur theorie der magnetischen sperschiht in halbleiter // *Z. Naturforsch.* – 1955. – v.10. – No5. – P. 476–488.
132. Mikoshiba H. Silic on nitride film thickness dependence on bipolar transistor characteristics // *Journal of Elechrical Society*. – 1976. – v.123. – No10. – P.1539–1545.
133. Morin F.J., Geballe T., Herring C. Temperature dependence of the piezoresistance of high purity Si and Ge // *Physical Review*. –1957. – v. 105. – No. 2. – P. 525–539.
134. Okamoto F., Koike T., Tosima S. Experimental evidence for helical instabilities in a semiconductor plasma // *Journal of Physical Society Japanese*. – 1962. – v. 17. – No 5. – P. 804–807.
135. Pat. USA No 3.329. 023, 4.7.1967. Semiconductor strain gauge transducers / Kurtz A. D., Englewood N. J., Jones E. J.
136. Pat. USA No 4.065.970, 5.01.1978. Diffused semiconductor pressure gauge / Wilner L. B.
137. Pat. USA No3.888.708, 10.06.75. Method for forming regions of predetermined thickness in silicon / Wise K. D., Samaun G.
138. Pearson G.L., Reed W.T., Feldman W.L. Deformation and fracture of small silicon crystals // *Acta Metallurgica*. – 957. – v. 5. – P. 181.
139. Pfann W.G., Thurston R.L. Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects // *Journal of Applied Physics*. – 1961. – v. 32. – P. 2008–2019.
140. Pollak M. Piezoresistance in heavily doped n-type germanium//*Physical Review*. – 1958. – v. 111, No. 3. – P. 798–802.

141. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon // *Physical Review*. – 1954. – v. 94. – No1. – P. 42–49.
142. Stradling R.A., Zhukov W.W. Cyclotron resonance of electrons in silicon at temperature up to 200K // *Proceeding of Physical Society*. – 1966. – v. 87. – P. 263–271.
143. Time and technology: Looking ahead in electronics // *IEEE Spectrum*. –1975, No. 4. – P. 41–46.
144. Woorthuysen J.A., Bergveld P. The influence of tensile forces on the deflection of circular diaphragm in pressure sensors // *Sensors and Actuators*. – 1984. – No. 3. – P. 201–215.
145. Wallis G., Pomerantz. D.I. Field assisted glass-metal sealing // *Journal of Applied Physics*. – 1969. – v. 40. – No10. – P. 3946–3949.
146. Welker H. Zur Theorie der galvanomagnetischen Effecte bei gemischter Leitung // *Z. Naturforsch. A*. –1951. – v. 6. – No4. – P.184–191.
147. Wilner L.B. A diffused silicon pressure transducer with stress concentrated at transverse gauges' // *ISA Transactions*. – 1978. – v.17. – No1. – P. 83–91.
148. Zias A.R., Hare W.F.J. Integration brings a generation of low-cost transducers // *Electronics*. – 1972. – v. 45. – No. 25. – P. 83–88.

ДОДАТКИ

Додаток 1

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Полупроводниковые дистанционные манометры. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А. и др. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Республиканский межведомственный сборник. -Киев: Наукова думка. -1981, вып. 34, —С. 71-75. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
2. Полупроводниковый преобразователь давления и температуры. Романов В.А., Михайленко И.В., Святогор Л.В., Кондрашкин В.Ф. // Приборы и системы управления, 1983, №10. -С. 22-23. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
3. Анизотропия осцилляторного эффекта в многодолинных полупроводниках кубической симметрии. Бойко И.И., Буянов А.В., Михайленко И.В. и др. // Украинский физический журнал. -1984, Т. 29, №8, -С.1230-1236. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
4. Буянов А.В., Михайленко И.В. Преобразователь перемещения на основе магнитоконцентрационного эффекта // Приборы и системы управления. — 1985, №3. - С. 27-28. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
5. Дифференциальный тензотранзистор. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А., Сердега Б.К. // Приборы и системы управления. -1987, №5. —С. 26. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
6. Михайленко И.В., Орлов А.Т., Сердега Б.К. Интегральный преобразователь давления на основе эффекта поперечной тензоэдс. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 29 (68), №3. 2018. С. 181-188. Особистий

внесок дисертанта: участь у постановці задачі, виконанні досліджень, інтерпретації результатів та написання статті.

7. Михайленко И.В., Орлов А.Т., Сердега Б.К. Модуляционно-поляризационная диагностика термонапряжений в интегральном преобразователе давления. // Физика и техника полупроводников, 2017, том 51, вып. 4. –С. 524-528 (іноземне видання). Особистий внесок дисертанта: участь у виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
8. Авт. свид. №907406. Устройство для измерения сил. Жадько И.П., Михайленко И.В., Романов В.А. - Опубл. 23.02.82, Бюллетень ОИПОТЗ №7. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень.
9. Управляемый магнитным полем сигнализатор давления. Буянов А.В., Жадько И.П., Михайленко И.В. и др. // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, АрмССР, 1985. – С. 31-32. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
- 10.Буянов А.В., Михайленко И.В. Магнитоконцентрационный датчик положения // Тезисы конференции "Полупроводниковые магниточувствительные приборы", г. Абовян, АрмССР. —1985. -С, 22-24. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
- 11.Полупроводниковый дистанционный манометр ПДМ-2. Романов В.А., Жадько И.П., Михайленко И.В. и др. // Тезисы седьмого Всесоюзного семинара по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации, Москва, 1981. -98с. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.
- 12.Mikhailenko I.V., Orlov A.T., Serdega B.K. Diagnostics of Thermal Stress in MEMS Pressure Transducer Based on Tenso-e.m.f. Effect // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology — P. 201-204. Особистий внесок дисертанта: участь у плануванні експерименту, виконанні досліджень, інтерпретації результатів.

Додаток 2 СВІДОЦТВО НА ВІНАХІД



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 907406

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Устройство для измерения сил"

Автор (авторы): Жадько Иван Павлович, Михайленко Игорь
Всеволодович и Романов Валентин Александрович

Заявитель: ИНСТИТУТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ АН УКРАИНСКОЙ ССР

Заявка № 2951292 Приоритет изобретения 4 июля 1980г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

21 октября 1981г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета *Валентин*
Начальник отдела *Виталий*

МПФ Гознака. 1979. Зак. 79-3083.

Додаток 3 СВИДОЦТВО ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ТатНИПИнефть

Р.Х. Ибатуллин

" " 1983 г.

Справка

об использовании в Татарском Государственном научно-исследовательском и проектом институте (ТатНИПИнефть) результатов кандидатской диссертации И.В. Михайленко.

Диссертационная работа И.В. Михайленко содержит описание двух новых полупроводниковых дистанционных приборов для измерения давления (ПДМ-2) и для одновременного измерения давления и температуры (ПДМТ-1), разработанных в соответствии с договорами о научно-техническом содружестве между ИП АН УССР и ТатНИПИнефть и хозяйственными договорами 1977-1982 гг., созданными специально для исследования битумных месторождений. В разработке опытных образцов этих приборов, в их изготовлении, настройке и испытаниях И.В. Михайленко принимал самое активное участие. Эксплуатация опытных образцов ПДМ-2 и ПДМТ-1 показали, что эти приборы надежны в работе, способны работать со стандартным оборудованием каротажных станций.

Экономический эффект от использования ПДМ-2 в ТатНИПИнефть за период с 1977 по 1981 гг. составил 306,4 тыс. руб. Этот прибор в 1979 г. успешно выдержал Государственные приемочные испытания и внесен в Государственный реестр СССР (№ 7453-79). Серийный выпуск ПДМ-2 намечен на заводе "Нефтеавтоматика" (г. Бугульма). Ожидаемый годовой экономический эффект от использования одного прибора типа ПДМТ-1 составит 6034 руб.

Зав. сектором промысловых исследований залежей вязких нефтей и битумов, к.т.н.

В.Ф. Кондрашкин