

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису
УДК 621.315.592; 681.2.001.63

Б А Й Ц А Р
Роман Іванович


**РОЗРОБКА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
ВІБРАЦІЙНО-ЧАСТОТНИХ СЕНСОРІВ
ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Спеціальність 05.27.03 — Технологія, обладнання
та виробництво матеріалів і пристроїв
електронної техніки

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ЛЬВІВ 1995



27.38



00376384 (V)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у науково-дослідному відділі мікроелектронних сенсорів (НДМ) Львівського університету "Львівська політехніка".

Науковий консультант - доктор фізико-математичних наук, професор Курило І.В.

- Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук, професор Коломоєць В.В.
- доктор технічних наук, професор, академік ІАН України Фомиця Л.М.
- доктор технічних наук, професор, академік ІАН України Готра З.Ю.

Провідна організація - Державний науково-дослідний інститут "Система", м.Львів

Захист відбудеться 26 жовтня 1995 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д.04.06.18 при державному університеті "Львівська політехніка", (290646, м.Львів-13, вул.С.Вандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися в Науковій бібліотеці університету (290013, м.Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 23 09 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради д.ф.-м.н., професор

Я.С.Буджак

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасні тенденції у приладобудуванні характеризуються широким впровадженням напівпровідникової техніки, мініатюризацією елементів і вузлів, їх уніфікацією. Стосовно до сенсорної електроніки, ці тенденції можуть бути реалізовані шляхом використання напівпровідникових матеріалів і структур для створення чутливих елементів, які базуються на нових принципах і технологіях. Це дозволяє ефективно вирішувати багато питань вимірвальної техніки, приладобудування та мікроелектроніки.

Одним з найбільш перспективних напрямків розробки прецизійних частотних сенсорів є використання напівпровідникових киткоподібних монокристалів (НК), які відзначаються досконалістю структури, високою механічною міцністю і пружністю, радіаційною стійкістю та можливістю використання їх п'єзореєсивних властивостей для збудження власних механічних коливань.

Напівпровідникові вібраційно-частотні перетворювачі (ВП) з електромеханічними резонаторами на базі НК здатні забезпечити високу чутливість, стабільність, відтворюваність, лінійність вихідної характеристики, простоту конструкцій, надійність, мінімальні габарити і масу. Всі ці якості відповідають вимогам, які ставляться до вимірвальних перетворювачів з боку інформаційно-вимірвальних систем.

У зв'язку з цим, а також відповідно до специфіки практичних завдань одержання напівпровідникових НК із заданими властивостями і створення на їх основі ефективних перетворювачів, приладів і пристроїв є актуальною науковою і технічною проблемою.

Робота виконувалася у відповідності з реальними потребами ряду підприємств і організацій і як складова частина плану фундаментальних досліджень Міністерства УРСР і АН УРСР в 1980-1990 рр., постановою Президії АН УРСР N 38 від 5.07.1979 р. (т.1.3.3.5 N д.р. 89002237),

НПІ С.74.01 "Світовий океан", постановва ДКНТ СРСР N 376 від 14.08.1986 р. (т.13.01.01.НІ N д.р. 01970039208). ДКНТ України, постановва ДКНТ N 19 від 14.07.1992 р. (т.ДК/ф.30 "Сплав" N д.р.01970040303), НДР Міно освіти України, Рішення експертної Ради Мінвузу УРСР N 78 від 21.03.1991 р. (т. ДБ/30 МНР N д.р. 01930040369).

Метою роботи є створення нового класу напівпровідникових вимірвальних перетворювачів (ВП) з підвищеними метрологічними і експлуатаційно-функціональними характеристиками, призначених для застосування в пристроях сенсорної електроніки та інформаційно-вимірвальної техніки.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- теоретичні та експериментальні дослідження стрункового варіанту тензорезистивного методу вимірвання деформації;
- пошук матеріалу для чутливого елемента (ЧЕ), встановлення залежності між параметрами ЧЕ і факторами, що їх забезпечують; розробка технологічного процесу вирощування напівпровідникових монокристалічних струн;
- побудова перетворювачів з резонаторами на пружних коливаннях напівпровідникових монокристалічних струн та оптимізація їх характеристик; обґрунтування вибору матеріалу пружного елемента (ПЕ) (підкладки);
- технологічні дослідження щодо розробки методів посадки та закріплення монокристалічних струн на різних матеріалах ПЕ; розробка методик розрахунку перетворювачів;
- аналіз специфіки побудови вимірвального генератора, проектування електронної схеми формування вихідного сигналу та збудження резонатора вібраційно-частотного тензоперетворювача;
- створення, експериментальне дослідження і впровадження нових конструкцій частотних ВП в засоби електроніки та інформаційно-вимі-

ривальної техніки.

Конкретна особиста участь автора в одержанні наукових результатів. Особистий вклад автора полягав у загальній постановці і обґрунтованості задачі досліджень, її конкретній реалізації на всіх етапах роботи, інтерпретації та узагальненні отриманих результатів, підготовці публікацій, участі у натурних випробовуваннях сенсорів у двох Далекосхідних науково-дослідних експедиціях "Тунамі" Інституту морської геології і геофізики РАН. Всі висновки і основні положення, винесені на захист, належать автору.

Об'єкт і методи дослідження. Дослідження проведені на кристалах Si і сплавах Si-Ge, одержаних в технологічній лабораторії НДВ НМС ДУ "Львівська політехніка".

Дослідження якості і досконалості структури НК здійснювалося рентгеноструктурним і металографічним методами, вимірюванням одновісного розтягу (стиску) і релаксації напружень, а також методом циклічних навантажень з вимірюванням власних параметрів за величиною тензосигналу.

Метрологічні характеристики резонаторів тензоперетворювачів досліджували експериментально на спеціальних установках з використанням для обробки результатів вимірювань методів математичної статистики і EDM.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- оптимізовані умови росту, встановлені закономірності впливу технологічних факторів на фізичні та фізико-механічні властивості мікрокристалів Si і Si-Ge для використання їх як чутливих елементів вібраційно-частотних тензоперетворювачів;

- розроблена методика досліджень НК в умовах циклічних навантажень, виявлена специфіка властивостей і структури кристалів, що дозволяє суттєво підвищити стабільність і точність вимірювання їх параметрів;

- оцінено величину тензосигналу, який виникає внаслідок згину і розтягу кристала при коливанні, встановлено зв'язок параметрів цього тензосигналу з геометричними і пружними параметрами НК, їх осьовим напруженням, добротністю коливної системи, амплітудою, частотою і фазою механічних коливань;

- розвинуто теорію вимірвальних перетворювачів, що базуються на взаємозв'язку механічних і електрофізичних властивостей в напівпровідникових НК, в яких здійснюється пряме перетворення механічних коливань в частоту;

- запропоновані функціональні схеми, які базуються на струнному варіанті тензорезистивного методу вимірювання деформації, досліджені передаточні функції вимірвальних процесів, встановлені аналітичні залежності механічних і електричних характеристик розроблених вимірвальних систем з величинами, що визначають похибку вимірювання.

Практичне значення. Запропоновані способи, методики і установки можуть бути використані при вивченні зв'язку фізико-хімічних параметрів і структури напівпровідникових НК з їх фундаментальними фізичними властивостями, що, в свою чергу, розвиває теорію циклічної міцності твердого тіла.

Вироблені конкретні рекомендації щодо чутливих елементів резонаторів перетворювачів механічних коливань в частоту для підвищення їх експлуатаційної стабільності. Створено новий клас напівпровідникових ВП, які відрізняються частотним виходом, конструктивною простотою, високою чутливістю, точністю, малими габаритами і масою, що відповідає вимогам, яким повинні задовільняти ВП в сучасних інформаційно-вимірвальних системах і дозволяє підвищити їх якість. Розроблені варіанти конструктивних, технологічних і схематичних реалізацій.

Результати досліджень підтверджують перспективність використання такого класу перетворювачів для створення ввірцевих засобів вимі-

ривання в уніфікованому вторинному апаратурою.

Реалізація роботи. Результати дисертаційної роботи використані при створенні систем вимірювання повітряних сигналів (Ульянівське КБ приладобудування, ЦКБ "Красногорський механічний завод", ВНДІ метрології ім.Д.І.Менделєєва); систем реєстрації гідрофізичних параметрів вимірально-керувачого модуля автономної донної гідрофізичної станції (ІМГ і Г РАН, Кіровоград-Самарський); систем життєзабезпечення гіпербарокомплексів (СКБЕ, Москва); силомасовимірвальних пристроїв (ІІМ НАН, СКТЕ "Ювеліпром", Львів).

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження.

Апробація роботи. Основний зміст і результати роботи доповідалися і обговорювалися на III Всесоюзній конференції "Нитевидные кристаллы для новой техники" (Вороніж, 1979); Всесоюзній конференції "Датчики на основе технологии микроэлектроники" (Москва, 1983); Всесоюзних конференціях "Тенасметрия" (Свердловськ, 1983, 1989); Всесоюзних конференціях "Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления" (Пенза, 1986, 1989, 1991, 1992, міждержавній - 1994); VI Всесоюзній конференції "Электротермометрия-88" (Луцьк, 1988); нараді по дослідженню і застосуванню твердих розчинів Si-Ge (Баку, 1988); VI науково-технічній конференції з міжнародною участю "Микроэлектроника-88" (Ботевград, Болгарія, 1989); Всесоюзних школах "Технические средства и методы освоения океанов и морей" (Москва, 1989, 1991); Всесоюзній науково-технічній конференції "Информационно-измерительные системы" (Москва, 1989); Всесоюзній науково-технічній конференції "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибірськ, 1990); International annual school Research Laboratory on Semiconductor and Hybrid Technologies (Софія, Болгарія, 1989); Всесоюзній конференції "Интегральные преобразователи неэлектрических величин" (Баку, 1989); I Всесоюзній науково-технічній конференції "Актуальные проблемы технологии композиционных материа-

лов и радиокомпонентов микроселектронных ИС" (Київ, 1990); International annual school with posters on micro- electronic sensors and semiconductor lasers (Sozopol, Bulgaria, 1990); VIII координаційній нараді по дослідженню і застосуванню сплавів Si-Ge (Ташкент, 1991); Workshop on Microelektronik Sensors EAST-WEST (Sozopol, Bulgaria, 1991); VIII Всесоюзній конференції по росту кристалів (Харків, 1992); International conference on electronic materials (Novosibirsk, 1992); VIII Міжнародній конференції "Електричні методи та засоби вимірювання температури" (Львів, 1992); International conference Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (Novosibirsk, 1992, 1994); Школи-семінари "Релаксационные явления в твердых телах" (Вороніж, 1993); V Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993); International conference on Fracture ("ICF-8") (Kiev, 1993); The European Conference Physics of Magnetism (Poznan, Poland, 1993); Конференції з міжнародною участю "Приладобудування та нові інформаційні технології" (Вінниця-Миколаїв, 1993); 2-nd International Symposium on energy, ecology, economy (Баку, 1993); I Міжнародній конференції з конструкційних і функціональних матеріалів (Львів, 1993); Республіканській конференції "Фізика-93" (Баку, 1993); V Науково-технічній конференції "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань" (Харків, 1994); Всеросійській науково-технічній конференції з міжнародною участю "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" (Таганрог, 1994); 30-й нараді з фізики низьких температур (Дубна, 1994); I Міжнародній науково-технічній конференції "Матеріалознавство алмазоподібних і халькогенідних напівпровідників" (Чернівці, 1994); International conference on magnetism ("ICM'94") (Warsaw, Poland, 1994); Міжнародній науково-практичній конференції "Совершенствование стройматериалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических усло-

виях" (Суми, 1994); Конференції з міжнародною участю "Приладобудування - 94" (Винниця, 1994). Крім того результати виконаних досліджень доповідалися на науково-технічних конференціях ДУ "Львівська політехніка" та наукових семінарах (1980-1994 рр.).

Ряд розробок за результатами дисертації експонувався на виставках. Автор нагороджений Золотою медаллю ВДНГ СРСР (1987) і Дипломом першого ступеня ВДНГ УРСР (1988).

Публікації. Результати виконаних досліджень відображені в 92 наукових працях 11 авторських свідоцтвах, 2 патентах і 3 заявках на винаходи з пріоритетом Держпатенту України.

Структура і обсяг. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти глав і висновків, викладених на 322 сторінках машинописного тексту, містить 21 таблицю, 119 рисунків, список літератури з 262 назв і додаток, в якому наведені документи, які підтверджують впровадження виконаної роботи.

На захист вносяться такі результати і положення:

1. Методика досліджень тензорезистивного способу прямого перетворення механічних коливань напівпровідникового НК в електричний сигнал. Спосіб досягнення високої стабільності і точності вимірювання власних параметрів кристалів за величиною тензосигналу при їх циклічному навантаженні в частотному діапазоні від одиниць до десятків кілогерц. Теоретичний аналіз, який адекватно і повно відображає процес перетворення в такій високочастотній коливній системі.

2. Технологія вирощування НК Si і Si-Ge із наперед заданими властивостями для електромеханічних резонаторів, методи керування досконалістю структури, фізико-механічними властивостями кристалів за допомогою технологічних факторів.

3. Спосіб побудови напівпровідникового ВП деформації (або іншої фізичної величини, яка може бути введена до деформації) в частоту. Розрахунок та оптимізація його характеристик.

4. Конструктивно-технологічні та схемотехнічні методи створення резонансного модуля, перетворювачів та інших приладів на базі НК Si і Si-Ge з підвищеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками, що підвищує якість і техніко-економічну ефективність вимірювальних систем.

5. Результати експериментальних і теоретичних досліджень, які можуть бути основою розробки нових перспективних елементів для радіоелектронних пристроїв та засобів вимірювальної техніки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Сучасний стан і перспективи розвитку вимірювальних перетворювачів
Нові, більш жорсткі вимоги до вимірювальних перетворювачів, суттєво збільшений потік інформації приводить до необхідності використання засобів цифрової обчислювальної техніки та пошуку нових можливостей побудови давачів інформації, вихідний сигнал яких угоджується з входом обчислювальних комплексів.

При розробці прецизійних засобів вимірювання перевагу віддають перетворювачам вимірюваної величини в електричний сигнал, який змінюється за частотою. Це зумовлено тим, що частоту або період коливань електричного сигналу можна вимірювати з високою точністю. За даними досліджень, проведених в Московському Інституті систем керування, під керівництвом проф., д.т.н. Д.І.Агейкіна, точність перетворювачів з металевими струнами, з урахуванням усіх дестабілізуючих факторів, може досягти 10^{-5} %. Аналіз літературних даних показав, що найбільше практичне застосування знаходять резонансні перетворювачі, які містять високочастотну механічну коливну систему. Порівняно з іншими видами частотних перетворювачів резонансні мають ряд суттєвих переваг, що забезпечує високу ефективність їх розробки і впровадження.

Якісно новий етап у розвитку вимірювальних перетворювачів відкриває широке застосування напіпровідникових матеріалів, з яких ви-

користуються тензорезистивні (п'язорезистивні) ефекти. Вирішальним фактором економічної ефективності використання напівпровідникових перетворювачів є їх безвідмовність, достовірність зберуваної інформації, можливість проведення якісно нових вимірювань. Цей напрямок є сферою особливої уваги при розробці нових матеріалів для ЧЕ і старенні на їх базі лавачів ширшого функціонального призначення. Рівні умови експлуатації, велика різноманітність вимірюваних параметрів привели до розробки великої кількості їх типів (табл.1). В п.6.7 наведено розробки, які є предметом досліджень цієї дисертаційної роботи.

Таблиця 1

№ в/п	Тип перетворювача	Основні вимірювані параметри	Похибка вимірювання, %
1.	Тензорезистивний (а дискретним чутливим елементом)	Деформація, тиск, сила, прискорення, рівень, переміщення	0,25 - 1
2.	Перетворювач на основі тензорезисторної структури (МТС)	Деформація, тиск, сила, прискорення	0,5 - 1
3.	Мікроелектронний перетворювач на основі інтегральних КІІ структур	—————"————	0,25 - 0,5
4.	Перетворювач на поверхнево-акустичних хвилях (ПАХ)	—————"————	0,01
5.	Інтегральний вібраційно-частотний	—————"————	0,05 - 0,1
6.	Терморезистивний на основі напівпровідникового ниткоподібного кристала (НК)	Переміщення, сила, тиск, прискорення, щільність потоку, температура	0,5 - 1,5
7.	Вібраційно-частотний тензоперетворювач на НК	Деформація, тиск, сила, прискорення, температура	0,001 - 0,01

Проблема дослідження полягає в узагальненні основних принципів

системного проектування ВП з напівпровідниковими ЧЕ, пошуку принципово нових конструктивно-технологічних і схемотехнічних рішень, які забезпечують підвищення чутливості, стабільності і експлуатаційної надійності, а також можливості уніфікації та нормування їх параметрів. У відповідності з концепцією комплексного підходу до вирішення поставленої проблеми сформульовані мета та завдання досліджень.

Побудова та фізичний принцип роботи перетворювача з напівпровідниковим монокристалічним резонатором. Нові перспективи у створенні електромеханічних резонаторів для ВПП перетворювачів відкриваються при використанні напівпровідникових ниткоподібних монокристалів. Досконалість структури і пов'язана з нею досконалість їх фізико-механічних властивостей, дозволяє розглядати НК як механічне середовище, міцнісні і пружні характеристики якого близькі до ідеальних, і дозволяє реалізувати на них коливну систему з максимально можливою добротністю, стабільністю і надійністю. Крім того, напівпровідникові НК проявляють значний п'єзореzистивний ефект, що дозволяє використовувати їх електрофізичні властивості для збудження механічних коливань. Як правило, вибір матеріалу струни визначає і вибір системи збудження коливань. Як показали результати досліджень, певні переваги має електростатичний спосіб збудження механічних коливань НК. Це створює виняткові зручності при конструюванні нового класу частотних перетворювачів, робота яких базується на струнному варіанті тензорезистивного методу вимірювання (рис.1).

Використанням монокристалів Si і Si-Ge як осциляторів вдалося найбільш повно реалізувати принципові переваги частотних перетворювачів з механічними резонаторами. По-перше, пряме перетворення механічних коливань в електричні в середині самого кристала, який коливається, виключає використання спеціальних перетворювальних пристроїв (навісних елементів), що суттєво спрощує конструкцію перетворю-

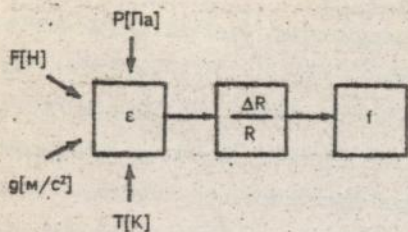


Рис. 1. Тензорезистивний принцип перетворення механічних коливань напівпровідникового НК в частоту.



Рис. 2. Схема роботи електромеханічного резонатора-тензоперетворювача з електростатичним збудженням НК

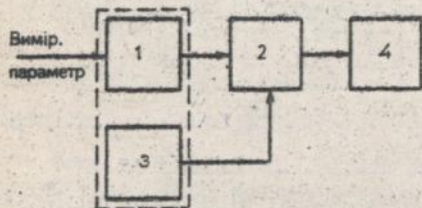


Рис. 3. Структурна схема напівпровідникового вібраційно-частотного тензоперетворювача

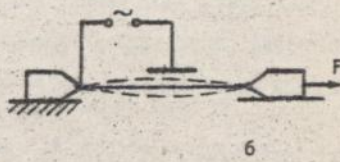


Рис. 4. Способи збудження механічних коливань НК:
а - магнітоелектричний; б - електростатичний

вача, підвищує її надійність і метрологічну здатність. По-друге, підвишені пружні властивості кристалів, відсутність в них пластичної деформації, гістерезису дозволяє досягти значно вищих значень чутливості і відтворюваності результатів. По-третьє, локальне закріплення кінців кристала у вузлах дозволяє використовувати короткі і тонкі нитки, що забезпечує максимальну чутливість. Оскільки НК здатні зберігати пружні властивості майже до межі міцності, діапазон вимірювання деформації значно розширюється.

При моделюванні роботи ВТП НК розглядали у вигляді тонкої пружної струни з жорстко закріпленими кінцями (рис.2), нехтуючи втратами енергії у вузлах кріплення і враховуючи лише опір середовища. Таке наближення виправдане жорсткістю кріплення НК за допомогою склоцементів.

Між кристалом 1 і збуджуючим електродом (ЗЕ) 2 створюють змінну напругу, в результаті чого виникає сила електростатичної взаємодії:

$$P = \frac{c^2 U^2}{4\pi\epsilon_0 b^2} \sin^2 \omega t - P_0(1 - \cos 2\omega t), \quad (1)$$

де b - віддаль між НК і ЗЕ; c - ємність системи НК-ЗЕ; ϵ_0 - абсолютна діелектрична стала. Ця сила є силою притягання, яка складається зі сталої складової P_0 і змінної гармонійної - $P_0 \cos 2\omega t$.

Під дією гармонійної збуджуючої сили в кристалі встановлюються гармонійні синусоїдні коливання. Рівняння поперечних коливань кристала при цьому має вигляд:

$$y(x,t) = \frac{4P}{\pi l \mu \omega_0} \sin \omega_0 t \cdot \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (2)$$

де ω_0 - частота основного тону власних коливань НК (режим резонансу); n - номер гармоніки; амплітуда коливань і максимальне відхилення точки x в момент часу t :

$$A = \frac{4P}{\rho l \omega_0}, \quad y_m(t) = \frac{4P}{\rho l \omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (3)$$

Принцип роботи ВП баується на тому, що при коливанні НК деформується, тобто його довжина періодично змінюється. Загальна довжина кристала l в будь-якій момент часу t може бути записана як відрізок синусоїди $A(t) \sin \pi x/l$ між точками $x=0$, $x=l_0$, для яких зміщення $y=0$, де $A(t) = A_0 \sin \omega_0 t$.

Веручи до уваги, що довжина l кривої $y=y(x)$ визначається інтегралом

$$l = \int_0^{l_0} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} dx; \quad (4)$$

$$\text{знаходимо } l = l_0 \left[1 + \frac{\pi^2 A_0^2(t)}{4l^2} \right]. \quad (5)$$

Звідси відносне видовження струни (деформація)

$$\frac{\Delta l}{l} = \epsilon = \frac{\pi^2 A_0^2}{8l^2} (1 - \cos 2\omega_0 t). \quad (6)$$

Таким чином, при поперечних коливаннях кристала в ньому, поряд з початковою постійною деформацією, зумовленою натягом, виникає гармонійна складова з частотою, рівною подвоєній частоті коливань НК і амплітудою, пропорційною квадрату відношення A_0/l . Для тензочутливого кристала відносна зміна опору прямопропорційна деформації

$$\Delta R/R_0 = K \cdot \epsilon, \quad (K - \text{коефіцієнт тензочутливості}). \quad (7)$$

Змінна складова ϵ викликає зміну R кристала внаслідок тензоефекту

$$\Delta \tilde{R} = - \frac{\pi^2 K A_0^2}{8l^2} R_0 \cos 2\omega_0 t. \quad (8)$$

Якщо струна живиться постійним струмом I_0 , то в результаті коливань опору, виникають коливання напруги

$$\tilde{U} = - I_0 R_0 \frac{\pi^2 k A_0^2}{8 l^2} \cos 2\omega_0 t. \quad (9)$$

Частота цієї напруги може бути визначена за відомою наближеною формулою для ідеальної струни

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{b}{\rho}} \quad (10)$$

де l - довжина струни; b - механічне напруження в струні (зусилля розтягу); ρ - густина матеріалу.

Легко бачити, що при b розтягу $\approx 10^9$ Н/м² для НК з мінімальним діаметром ~ 5 мкм забезпечується максимальне значення власної частоти на одиницю довжини кристала. Мала величина густини напівпровідникового матеріалу (для Si $\rho = 2,33 \cdot 10^3$ кг/м³) дозволяє підтримувати коливання при мінімальних значеннях енергії збудження.

Фізична модель ВПІ (рис.3) містить:

1. Монокристалічний ПЕ, який сприймає виміркову величину і трансформує деформацію поверхні на НК. Практично повна відсутність гістерезису ($\sim 1 \cdot 10^{-9}$ при температурі 300°C у Si) забезпечує високі метрологічні характеристики.

2. Коливний елемент - електромеханічний резонатор, який змінює частоту власних коливань в залежності від рівня деформації кристала. У запропонованій моделі функції коливної і перетворювальної ланок суміщені в одному елементі - напівпровідниковому НК.

3. Збуджуючий елемент у вигляді електрода для подачі змінної напруги збудження. У цьому випадку як ЗЕ використовується поверхня ПЕ, що прилягає до кристала.

4. Пристрій для резотрації частоти тенаосигналу - цифровий частотомір класу точності $> 10^{-4}$.

На роботу запропонованого теносперетворювача суттєво не впливають температурні залежності коефіцієнта теносочувливості і опору, ос-

кільки вимірюваним параметром є частота коливань, яка визначається геометрією кристала, його механічними властивостями і прикладеним зусиллям. Чутливість такого тензоперетворювача до деформації досягає 10^9 Гц/відн.од. і є однією з найвищих серед відомих напівпровідникових перетворювачів.

Дослідження струнного варіанту тензорезистивного методу вимірювання. Розроблені установки і методи досліджень НК в умовах циклічних навантажень дали можливість виявити специфіку їх властивостей і структури, суттєво підвищити стабільність і точність вимірювання параметрів вихідного тензосигналу. Досліджена можливість збудження кристалів різних геометричних розмірів при використанні магнітоелектричного і електростатичного способів збудження (рис.4). Визначені оптимальні умови збудження і вплив на колильний режим НК способу закріплення їх кінців. Встановлено, що закріплення НК за допомогою оклоцементів, механічні і температурні властивості яких є близькими до властивостей НК, відазначається технологічністю і забезпечує надійне з'єднання. Встановлено, що найбільш раціональним способом збудження механічних коливань кристала є електростатичний (рис.5). При моделюванні роботи резонатора як перетворювача досліджувалася залежність зміни частоти власних коливань НК від прикладеної до нього розтягуючої сили. Результати цих досліджень свідчать, що особливістю такого резонатора є широкий діапазон зміни частоти механічних коливань при деформації і достатній рівень амплітуди тензосигналу.

Оцінена величина тензосигналу, який виникає внаслідок згини і розтягу кристала при коливанні, встановлено зв'язок параметрів цього тензосигналу з геометричними і пружними параметрами НК, їх осьовим напруженням, добротністю коливної системи, амплітудою, частотою і фазою механічних коливань. Встановлено, що відносна зміна опору кристала

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

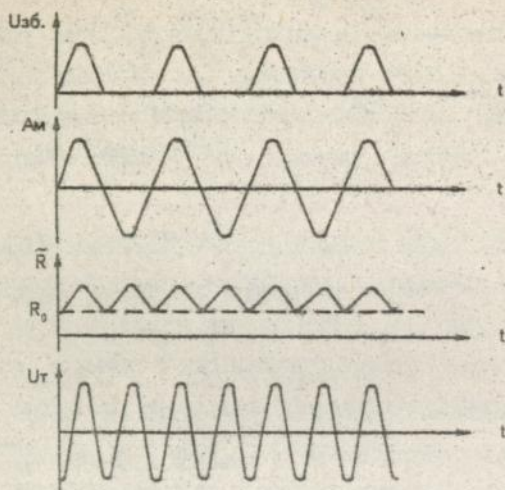


Рис. 5. Осцилограма збуджуючих імпульсів, амплітуди механічних коливань НК, зміни опору і електричного сигналу

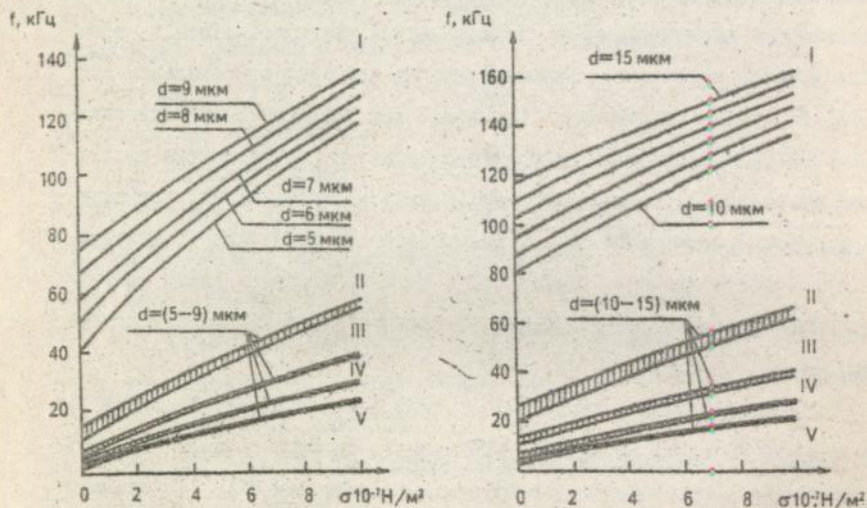


Рис. 6. Залежність $f(\sigma)$ для НК різної довжини і діаметру:
 I - $l=1$ мм; II - $l=2$ мм; III - $l=3$ мм; IV - $l=4$ мм; V - $l=5$ мм.

$$\frac{\Delta R''}{R_0''} = \frac{K^2}{4} \left(\frac{r}{l}\right)^2 + \left(\frac{A}{l}\right)^2 \int_0^l \left(\frac{d^2 U_0}{d\zeta^2}\right)^2 d\zeta, \quad (11)$$

зумовлена його деформацією згину при коливаннях, є величиною $\sim 10^{-4}$. U_0 - функція відхилення точки кристала від положення рівноваги з максимальним відхиленням - 1; A - максимальна амплітуда відхилення; l, r - довжина і радіус кристала.

Відносна зміна опору кристала внаслідок його розтягу при коливаннях пропорційна відносній деформації

$$\frac{\Delta R''}{R_0''} = \frac{K}{2} + \left(\frac{A}{l}\right)^2 \int_0^l \left(\frac{d^2 U_0}{d\zeta^2}\right)^2 d\zeta \sim 10^{-2}. \quad (12)$$

Отже, у цьому випадку зміна опору є на два порядки більшою. Зміна опору кристала, викликана деформацією розтягу і згину, пропорційна квадрату амплітуди його коливань.

Визначення оптимальних розмірів монокристалічних струн з НК.

Найбільш прийнятною фізичною моделлю розрахунку резонатора на базі НК є пружний однорідний стержень із закріпленими кінцями. Рівняння власних поперечних коливань такого стержня з урахуванням крайових умов має вигляд

$$1 - \operatorname{ch}k \cdot \operatorname{cosh} \frac{v^2}{2l\lambda} \operatorname{sh}k \cdot \operatorname{sinh} \frac{v^2}{2l\lambda} = 0. \quad (13)$$

Для нестягнутого стержня, коли $v^2 = 0$, рівняння спрощується

$$1 - \operatorname{ch}k \cdot \operatorname{cosh} k = 0. \quad (14)$$

Частоти перших гармонік знаходили методом послідовних наближень за допомогою ЕОМ. Деякі результати розрахунку показані на рис. 6 у вигляді графіків залежності частоти від механічного напруження σ , яке діє на одиницю площі поперечного перерізу кристала. Зміна частоти при зміні σ більша для коротких кристалів і зростає зі зменшенням їх діаметра. Це зв'язано з тим, що при зменшенні діаметра кристала колильний елемент за своїми властивостями наближається до ідеальної струни, оскільки його момент опору згину (жорсткість)

зменшується з діаметром, а відношення сили натягу до лінійної густини при постійному b не залежить від діаметра. Виявлені лінійна залежність власної частоти коливань НК від його діаметра i , приблизна, обернено пропорційна експоненціальна залежність цього параметра від довжини, підтверджують правильність вибраної моделі.

Визначальний вклад механічного напруження кристала в зміну частоти його власних коливань проявляється при відношенні довжини до діаметра в межах 200...500.

Технологія одержання напівпровідникових НК. Для створення напівпровідникових вібраційно-частотних тензоперетворювачів необхідна спеціальна технологія, яка б спрощувала і удешевлювала виготовлення ЧЕ з необхідними параметрами.

За основу був взятий метод вирощування кристалів з газової фази в закритій системі, розроблений в ДУ "Львівська політехніка" проф. Сандуловсь Г.В.. Використовуючи цей метод, вдається вирощувати монокристали високотемпературних напівпровідників при температурах, вищих від температур їх плавлення, проводити одночасне легування НК різними домішками в процесі кристалізації, а головне - одержувати досконалі монокристали із заданою морфологією і властивостями.

Забезпечення високої структурної досконалості НК, необхідних фізико-механічних та електрофізичних властивостей, якості поверхні, зв'язано з проблемою оптимізації технологічного процесу їх вирощування. Моделюванням технологічного процесу, одержані аналітичні залежності для визначення геометричних параметрів НК, їх електропровідності і коефіцієнта тензочутливості. Запропонована методика дозволяє визначити і інші параметри НК, які мають важливе значення при проектуванні перетворювачів; знизити обсяг технологічних досліджень, забезпечити економії матеріалів та енергоресурсів.

У роботі запропоновані технологічні способи керованого росту кристалів із заданими фізико-механічними властивостями. Оцінено

вплив технологічних факторів на властивості НК і оптимізовано параметри технологічного процесу. Визначено кінетичні параметри процесу кристалізації - критичний діаметр НК, ефективне пересичення, кінетичний коефіцієнт швидкості росту.

Конкретні розробки способів вирощування НК Si і Si-Ge виконані на рівні винаходів. У таблиці 2 наведені характерні співвідношення між концентраціями домішок в ампулі, питомим опором і властивостями НК $Si_{1-x}Ge_x$ ($x = 0,01...0,05$).

Таблиця 2

Концентрація домішки (мг/см ³)				Концентр. переносж. мг/см ³		Питом. опір, ρ Ом·см	Застосування
B ₂ O ₃	Au	Pt	Cu	Bг ₂	J ₂		
4·10 ⁻³ 4,5·10 ⁻³	6,1·10 ⁻⁴ 6,5·10 ⁻⁴	1,7·10 ⁻³ 1,75·10 ⁻³	-	2,5	-	0,012- 0,018	Тензоре- аистор
-	1,9·10 ⁻³ 1,95·10 ⁻³	-	5·10 ⁻² 5,5·10 ⁻²	2,5	-	0,40- 0,46	Терморе- аистор
-	1·10 ⁻⁴ 2,46·10 ⁻³	-	-	-	2	4,4	Термоане- мометр
-	1,9·10 ⁻³ 1,95·10 ⁻³	7,2·10 ⁻⁵ 7,5·10 ⁻⁵	-	2,5	-	47,5- 49,4	Фотопе- ретвора- ривач

Досліджено механічні, електричні, тензометричні та інші властивості НК Si-Ge, які є основою для створення ЧЕ давачів різного функціонального призначення.

Оцінка температурної залежності механічного стану монокристалічної струни резонатора. Параметром, який визначає технічні характеристики чутливого елемента ВП, зокрема, частоту власних коливань і чутливість до вимірюваного параметра є початкова деформація натягу ϵ_n . Температурна залежність ϵ_n є важливою складовою температурного дрейфу нуля, тому визначення шляхів її зменшення забезпечує оптимізацію температурних характеристик перетворювачів.

Величину ϵ_n кристала можна записати у вигляді:

$$\epsilon_n(T) = \epsilon_0 + \epsilon(T), \quad (15)$$

де ϵ - температурнонезалежна складова деформації НК, яка визначається технологією закріплення; $\epsilon(T)$ - температурночутлива складова.

Основними факторами, що визначають $\epsilon(T)$ є: умови теплособміну ЧЕ з оточуючим середовищем, геометрія кристала, умови його закріплення на ПЕ, температурні залежності коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів кристала $\alpha_k(T)$ і ПЕ $\alpha_n(T)$.

При роботі резонатора виникає перегрів ЧЕ внаслідок двох механізмів: виділення джоулевого тепла при проходженні електричного струму і внутрішнього тертя в кристалі, що коливається. У результаті температура НК буде на деяку величину ΔT вищою від температури оточуючого середовища (підкладки) T .

Виходячи зі сказаного, температурну складову деформації кристала можна оцінити за формулою

$$\epsilon(T) = - \int_{T_0}^{T+\Delta T} \alpha_k(T) dt + \int_{T_0}^T \alpha_n(T) dt, \quad (16)$$

де T_0 - температура закріплення НК на ПЕ.

Розраховані залежності $\epsilon(T)$ для НК Si, Ge, різних матеріалів ПЕ при різних температурах адгезиву T_0 . Зроблено висновки щодо оптимізації температурних характеристик ВПЧ.

На рис.7 наведено залежність $\epsilon(T)$ для Si НК і Si підкладки (ПЕ) при чотирьох значеннях ΔT і $T_0 = 500^\circ\text{C}$. Внаслідок перегріву НК в робочому інтервалі температур має місце невелика деформація стиску, яка слабо залежить від T , що є ідеальним варіантом для перетворювача. Перспективними виявилися такі матеріали підкладки як сапфір, літійовий ситал, алюмооксидна кераміка.

Специфіка конструювання та технології виготовлення ВПЧ. Для визначення передаточних характеристик запропонованих схем побудовані

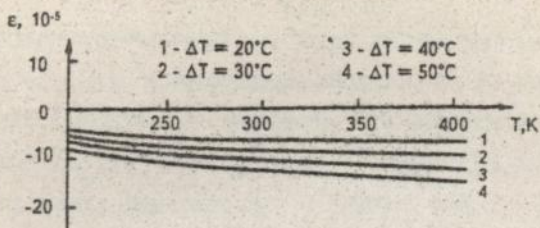


Рис. 7. Залежність $E(T)$ для НК Si закріпленого на Si ПЕ при різних значеннях перегріву кристала ΔT .

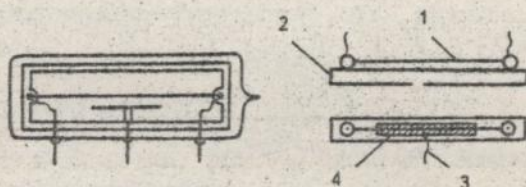


Рис. 8. Конструкції монокристалічних резонаторів.



Рис. 9. Конструктивні схеми вимірювальних перетворювачів на монокристалічній пластині, балці і мембрані

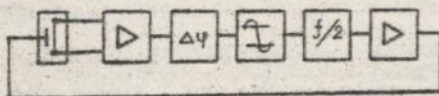


Рис. 10. Структурна схема автогенератора для ВТП

та досліджені їх математичні моделі. Встановлені аналітичні зв'язки між механічними та електричними параметрами.

Методика розрахунку ВПІ передбачає: визначення залежності механічних деформацій ПЕ заданої форми і розмірів від вимірюваного параметра в межах лінійної ділянки їх деформаційних характеристик; аналіз зв'язку деформації на поверхні ПЕ з механічним напруженням в НК для забезпечення їх угодженої роботи і досягнення максимальної чутливості перетворювача.

Для резонатора з НК, закріпленого кінцями симетрично відносно центра круглої мембрани, механічне напруження в кристалі:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_K = \frac{3P(1-\mu^2) E_K(z+h/2)}{16E_M h^3} (D_M^2 - l^2), \quad (17)$$

де P - вимірювальний тиск; μ - коефіцієнт Пуассона матеріалу мембрани; z - висота закріпленого кристала над мембраною; h - товщина мембрани; E_K , E_M - модулі пружності матеріалів кристала і мембрани, відповідно; D_M - діаметр мембрани; l - довжина НК.

При використанні квадратної мембрани, орієнтованої в площині (001), сторони якої напрямлені по кристалографічних напрямках [110], максимум ε кристала одержуємо для напрямків, паралельних сторонам мембрани. Механічне напруження для кристала, закріпленого в центрі мембрани, дорівнює

$$\sigma = \frac{2E_K(z+h/2)}{a^2} \left(1 - \frac{l^2}{4a^2} \right) \left(2C_1 + C_2 \left[2\frac{l^2}{4a^2} - \left(1 - \frac{l^2}{4a^2} \right) \right] \right), \quad (18)$$

де C_1 і C_2 - коефіцієнти апроксимації; a - половина сторони мембрани.

Для ПЕ у вигляді консольно закріпленої балки прямокутного перерізу зі сталою товщиною і змінною шириною деформація НК не залежить від його довжини і розміщення на балці. Відповідно механічне напруження кристала:

$$\sigma = \frac{12L(z+h/2)E_K F}{b_0 E h^3}, \quad (19)$$

де L - довжина балки; b_0 - ширина основи; F - вимірюване зусилля.

Власну частоту механічних коливань кристала у кожному з випадків можна розрахувати за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{AE_K(d/4)^2 + BGl^2}{\rho}}, \quad (20)$$

де d - діаметр кристала; ρ - густина матеріалу кристала; A і B - числові коефіцієнти, які залежать від g .

Розраховані залежності частоти від вимірюваної величини (деформації, сили, тиску) при різних геометричних розмірах ПЕ і НК для однострунного та диференційного ВПН.

Важливим напрямком досліджень, який визначає надійність роботи ВПН і основні їх характеристики, є розробка технології посадки та закріплення НК.

У розрахунок беремо не вихідний стан кристала після закріплення на підкладці, а вільний стан при коливанні. Ця умова є необхідною і достатньою для забезпечення коливань кристалів з будь-яким співвідношенням їх поперечних і подовжніх розмірів. З її врахуванням можна пояснити особливості, які спостерігаються на частотній залежності від умов збудження та дії зовнішніх факторів. Таким чином, дуже важливим у технології виготовлення резонаторів є забезпечення керуваності процесу посадки і закріплення НК. При певному співвідношенні склоцементу и наповнювача у вигляді мінералу з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення, форма вузла кріплення залишається незмінною, і механічний стан кристала є сталим. Принципово важливим є те, що затверділий розплав знаходиться у склоподібному або закристалізованому стані з мінімумом пластичності. Встановлена залежність зміни механічного стану кристала від режиму термосборки зв'язувача. Запропоновані способи забезпечують надійність з'єднання кінців НК з поверхнею різних матеріалів підкладки, рівномірність розподілу нап-

румень вадовж кристала.

Оптимальний варіант конструкції резонатора з електростатичним збудженням НК 1 (рис.8) містить підкладку (пластину) 2, на поверхні якої сформовано електричний контакт 3. У випадку використання для підкладки діелектричного матеріалу на її поверхню наносять металеву плівку 4, яка служить ЗЕ. Простота конструкції, угодженість матеріалів і спаз забезпечують високу добротність і надійність коливань.

При конструюванні ВТП як конструкційний матеріал використовувався монокристалічний кремній або спеціальна кераміка.

Конструктивні схеми вимірвальних перетворювачів на монокристалічній пластині, балці і мембрані наведені на рис.9.

Визначення умов роботи резонатора у вимірвальній схемі і побудова автогенератора. Для функціонування резонатора - тензоперетворювача необхідне збудження механічних коливань НК, перетворення цих коливань і реєстрація частоти електричного сигналу. Вимірвальний пристрій, який виконує ці функції, повинен забезпечувати легке збудження коливань резонатора на частоті власних коливань (механічного резонансу), надійність роботи, простоту реалізації, мінімальні масогабаритні параметри та енергоспоживання. Його основними функціональними елементами є (рис.10): частотодаючий елемент - монокристалічний резонатор з НК; попередній підсилювач - забезпечує достатній для виникнення автоколивань коефіцієнт підсилення; фазообертач - забезпечує умови балансу фаз при збудженні автоколивань; підсилювач-обмежувач - формує прямокутні імпульси для роботи тригера подільника; подільник частоти на два угоджує частоту виходу з частотою входу; підсилювач потужності - забезпечує необхідний баланс амплітуд для збудження схеми. Умовою стабільної роботи схеми вимірвального генератора (ЕГ) є стабільність фазового асуву і величини енергії, яка вноситься в контур резонатора за період коливань.

Для забезпечення оптимальних умов роботи резонаторів ВТП у ЕГ

розроблено і досліджено декілька альтернативних варіантів схем. Як показали результати випробувань, схема з фазовим автопідстроюванням частоти здатна утримувати необхідний рівень фази імпульсів збудження у широкому діапазоні зміни частоти, однак вона є порівняно складною і недостатньо стійкою в режимі генерації на резонансній частоті.

Як показали результати випробувань, найкраще всі вимоги задовільняється електронною схемою з фазовим підстроюванням частоти тенаосигналу. На рис.11 зображена структурна схема ВГ і осцилограми формування збуджуючих імпульсів. Ця схема покладена в основу ВГ для ВПІ з мінімальним впливом дестабілізуючих факторів.

Нові можливості і перспективи побудови простих і ефективних ВГ відкриває використання методів оптикоелектроніки. Розроблена і досліджена схема ВГ з волоконно-оптичною системою збудження НК. Крім схемних спрощень, такий ВГ має ряд переваг в порівнянні з класичним варіантом електронної схеми.

Певну увагу привертає розробка модульного варіанту схеми ВГ, що успішно проводиться сумісно з кафедрою конструювання, технології і виробництва напівпровідникових мікроелектронних елементів Технічного університету в Софії.

Метрологічні дослідження параметрів резонаторів вібраційно-частотних тенаоперетворювачів. Дослідженням роботи резонаторів встановлені умови, які характеризують механічний стан кристала в залежності від струму і напруги збудження. Характерні залежності частоти від струму через кристал і напруги збудження наведені на рис.12,13.

Критерієм вибору робочого струму є початковий механічний стан кристала, який повинен відповідати такому напруженню σ , при якому нагрів викликаний струмом, не спричиняв би помітного стиску НК. З іншого боку, величина струму повинна бути достатньою для одержання необхідного значення тенаосигналу при коливанні кристала. Найкращі

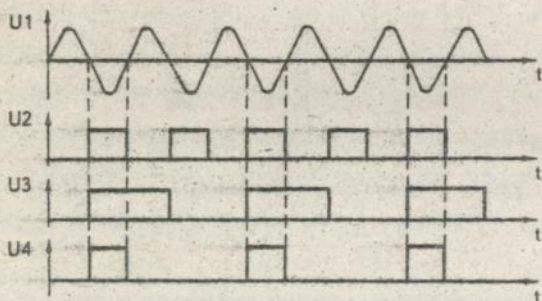
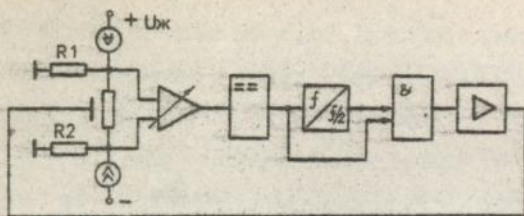


Рис. 11. Схема вимірювального генератора з фазовим зсувом тензо-сигналу (а) і осцилограми формування збуджуючих імпульсів (б).

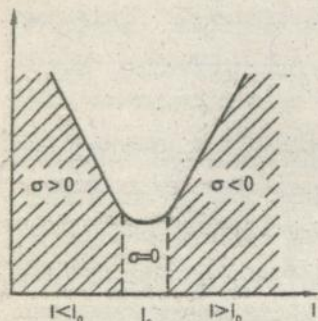


Рис. 12. Залежність частоти коливань НК від струму живлення

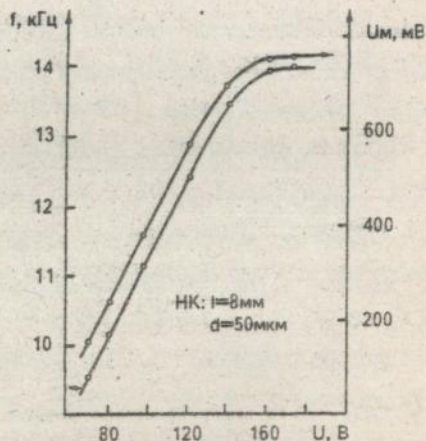


Рис. 13. Залежність частоти коливання НК і амплітуди тензосигналу від напруги збудження

умови роботи резонаторів забезпечуються при струмах 0,5...5 мА і напругах збудження 10...60 В в залежності від геометрії кристалів.

Для коливань у вакуумі величину вихідного напруження можна визначити як напруження, яке забезпечує частоту коливань НК на повітрі в 1,5 раза більшу частоти коливань при $\delta = 0$. Стабільність коливань у вакуумі на порядок вища ніж у повітряному середовищі. Збільшення геометричних розмірів ЧЕ резонаторів робить їх менш чутливими до параметрів збудження, і до різного роду дестабілізуючих факторів. Довготривала стабільність їх роботи ($\Delta f/f$) становить 10^{-5} ... 10^{-7} . Такий тип резонаторів має високу добротність $\sim 10^3$ при коливанні у повітряному середовищі. При коливанні у вакуумі добротність досягає 10^5 . Вона лінійно зростає з ростом частоти коливань резонатора.

Дослідження залежності зміни частоти резонатора від деформації проведені на балках рівного опору агину, виготовлених з різних матеріалів (інвар Н36, кераміка 22ХС, плавлений кварц, Si монокристалічний). Вони включали: циклічне навантаження і розвантаження балки каліброваними навантажками; визначення стабільності частоти при фіксованих навантаженнях; навантаження балки до її руйнування і аналіз стану вузлів кріплення НК; дослідження температурної стабільності частоти в кліматичному діапазоні температур. Чергування циклів навантаження-розвантаження в певній послідовності показали, що прямий і зворотний ходи характеристик мають ідентичний характер, оскільки вони відрізняються один від одного не більше, ніж на величину похибки вимірювання ± 1 Гц, що свідчить про відсутність гістерезисних явищ. Під дією фіксованих навантажень, в тому числі близьких до граничних для балки з Si, не спостерігалось зміни частоти резонатора ВПІ за час, протягом якого можна гарантувати стабільність роботи електронної схеми ВП. Результати цих досліджень підтверджують правильність вибору Si як матеріалу для ПЕ резонансних перетворювачів.

На рис.14 наведені статичні градувальні характеристики ВПІ,

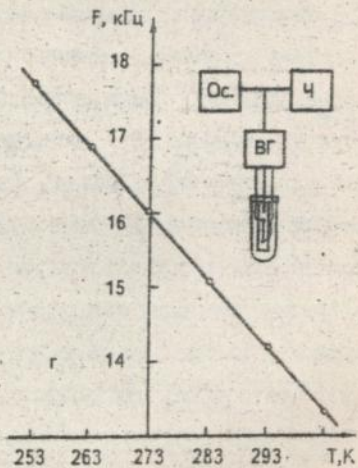
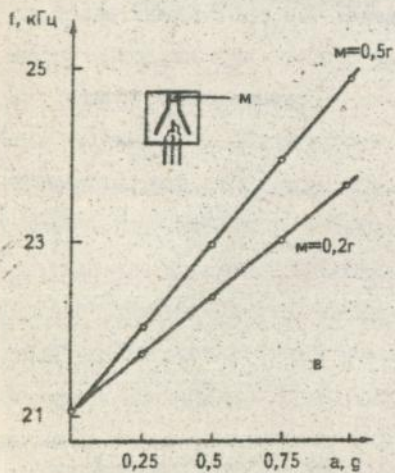
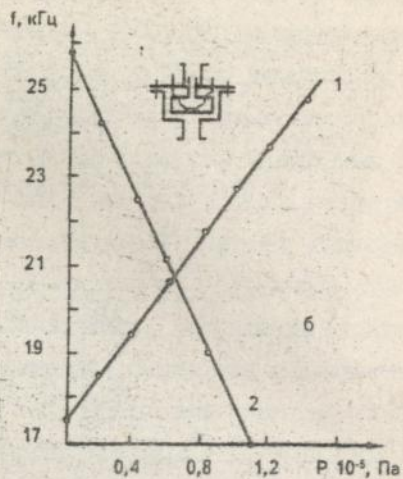
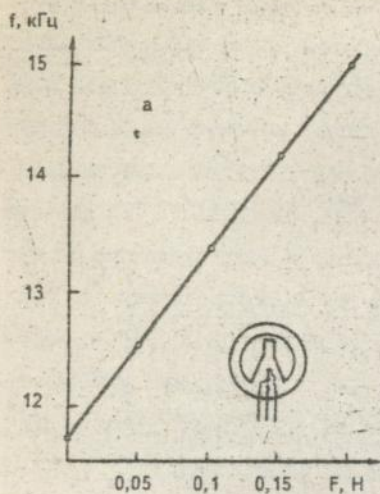


Рис. 14. Градувальні характеристики ВТГ сили (а), тиску (б), прискорення (в), температури (г)

сили, тиску, прискорення і температури. На залежності $f(P)$ крива 1 відповідає стану розтягу кристала, а 2 - його стиску.

Основна похибка вимірювання при п'ятикратних градуваннях становить 0,01...0,0001 %. Температурна складова похибки має такий же порядок. Результати довготривалих лабораторних та натурних випробувань ВП, їх зберігання протягом кількох років не показали будь-якої помітної зміни характеристик, що також свідчить про їх високу стабільність і надійність.

Інформаційно-вимірковальні пристрої на базі напівпровідникових ВП. З урахуванням реальних потреб ряду підприємств і організацій для вирішення ними конкретних науково-технічних задач створені і впроваджені такі прилади і пристрої, що базуються на нових способах:

1. Давачі опорних частот з керованими електромеханічними резонаторами для використання в радіоелектронних пристроях і засобах ав'яку забезпечують генерування стабільних низькочастотних коливань у повітряному середовищі і у вакуумі.

Технічні характеристики: діапазон частот 1...200 кГц; добротність 10^5 ; стабільність $\sim 10^{-6}$; діапазон робочих температур 223...423 К; розміри НК: довжина 1...10 мм, діаметр 8...50 мкм.

При відповідному зв'язанні монокристалічні резонатори можуть використовуватися як вузькосмугові механічні фільтри. Перспективним є створення на їх базі мініатюрних вимірвачів потужності НВЧ поля, газсанізаторів та вологомірів.

2. Давачі тиску для систем вимірювання повітряних сигналів мають перевагу за габаритами, масою, динамічними характеристиками. Конструкція уніфікованого давача містить Si мембранний вузол, який коаксіально закріплюється в арматурі корпусу. Технологією виготовлення давача забезпечується надійність з'єднання елементів і вакуумування мембранного модуля.

Технічні характеристики: діапазон вимірюваних тисків 0...120

кПа; мультипликативна похибка 0,06 %; нелінійність ~1 %; величина зміни частоти у вимірюваному діапазоні 6...13 кГц; власна частота коливань НК 30...40 кГц.

Такі частотні давачі надлишкового, абсолютного і різниці тисків є основою для створення прецизійних засобів вимірювання повітряних сигналів, які необхідні для оснащення нової авіаційної техніки.

3. Давач стану атмосфери (ДСА) для одночасного вимірювання комплексу метеорологічних параметрів. ДСА містить блок первинних перетворювачів (барометричного тиску, швидкості руху повітря, температури) і електронний блок. Для реєстрації атмосферного тиску і швидкості руху повітря вибрані мембранні конструкції перетворювачів. В останніх використана властивість потоку повітря створювати силний напір. Використання одного типу ЧЕ звужує елементну базу ДСА, уніфікує і спрощує електронну схему формування, обробки і реєстрації інформаційного сигналу. Чутливість ДСА:

- за абсолютним тиском в діапазоні 0...160 кПа13,3 Па
- за динамічним тиском (швидкісним напором)
повітря в діапазоні 0...600 Па1,5 Па
- за відносною швидкістю руху повітря
в інтервалі 0...30 м/с0,1 м/с
- за температурою в інтервалі 223...323 К0,05 К.

Конструкція ДСА забезпечує працездатність у несприятливих польових умовах.

4. Дифузійний вимірювач різниці тиску (ВРД) повітря для використання в аеродинамічних трубах. Прилад складається із термостата з давачем тиску, блока живлення з платою ВГ, блока регулювання електричних параметрів.

Технічні характеристики: діапазон вимірювання різниці тиску 15...6000 Па; похибка вимірювання ± 18 Па; температура навколишнього середовища 288...300 К; вологість повітря 40...100 %; споживана по-

тужність <20 Вт; температура в робочій камері $293 \pm 0,5$ К.

Проведені сумісно з ВНДІ метрології ім. Д.І.Менделєєва дослідження напівпровідникових ВПІ тиску засвідчили великі можливості їх застосування як ґравкових засобів вимірювання. Започатковано створення автоматизованих перевірних систем стаціонарного і портативного типу.

5. Давачі гідрофізичних параметрів для спеціальних автономних систем (донних станцій), які забезпечують неперервне дистанційне спостереження за станом океану. Вимірювальна система включає давачі (рівня, тиску і температури), блок перетворення і реєстрації сигналів, блок зчитування та обробки інформації.

Основні характеристики давача рівня (тиску): глибина випробовувань - 5 м; чутливість 2000 Гц/мм вод.ст.; діапазон зміни вихідного сигналу 46...82 кГц; нелінійність 0,14 %; мультиплікативна похибка 0,06 %; споживана потужність < 1 Вт.

Основні характеристики давача температури: діапазон вимірювання 275...313 К; чутливість 140 Гц/К; стабільність ± 1 Гц/год; нелінійність 0,2 %; споживана потужність < 1 Вт.

Натурні випробовування давачів проведені на шельфі о.Шикотан за програмою науково-дослідних експедицій "Цунами".

6. Вимірювання маси, сили, прискорення. Пристрій для вимірювання маси ювелірних виробів з дорогоцінних металів містить механічний вузол, консольний силдовимірювальний елемент і електричний перетворювач сигналу, який забезпечує вихід на автоматизовану систему обліку. Діапазон вимірювання маси 0...20 і 0...50 г. Точність вимірювання <2 мГ. Середня чутливість 300 Гц/г.

Динамометр для вимірювання зусиль стиску 200 мН і вище з ПЕ у вигляді спеціально армованого ситалового стержня застосовано для наукових досліджень.

Акселерометр з монокристалічним ПЕ у вигляді консолі застосо-

вано для вимірювання прискорень рухомих об'єктів. При об'єднанні кількох чутливих елементів в модуль забезпечується вимірювання напрямку векторів прискорень.

Технічна характеристика: діапазон вимірюваних прискорень $0...60 \text{ м/с}^2$; чутливість $> 0,1 \text{ мГц} \cdot \text{с}^2/\text{м}$; основна похибка $0,5 \%$; розмір ПЕ $12 \times 12 \text{ мм}$; маса акселерометра $\sim 1 \text{ г}$.

Особливу увагу заслуговує розробка гравіметра для геофізичного комплексу, який забезпечує вимірювання гравітаційних полів на борту судна або літака.

7. Теплові давачі та інші вимірювальні перетворювачі для комплексних автоматизованих систем життєзабезпечення гіпербарокомплексів і апаратів дифузійного збагачення повітря киснем.

Електромеханічні терморезистивні перетворювачі (лінійних переміщень, тиску, прискорення) порівняно з відомими аналогами мають значно менші габаритні розміри і масу, механічну і теплову інерційність, підвищену чутливість і роздільну здатність завдяки високому значенню ТКО кристала, розширені функціональні можливості за рахунок забезпечення необхідної залежності зміни опору від температури (лінійної, ступеневої, експоненціальної).

Мініатюрні високочутливі термометри опору і термоанемометри здатні забезпечити локальність вимірювання температури і швидкості потоку газу в складних умовах експлуатації.

Фотоелектричний перетворювач для реєстрації освітленостей чи світлових потоків зі спектральною чутливістю $0,8...1,25 \text{ мкм}$.

В и с н о в к и

1. Проведено аналіз стану і перспектив створення частотних вимірювальних перетворювачів, який показав, що вібраційно-частотні перетворювачі на основі нитроподібних монокристалів Si і Si-Ge відповідають вимогам високої точності, довготривалої стабільності, лінійності вихідної характеристики, відтворюваності в поєднанні з висо-

ристанням простої енерго- та ресурсоєберігаючої технології одержання напіпровідникових чутливих елементів.

2. Вперше при створенні напіпровідникових вимірвальних перетворювачів поряд з електрофізичними властивостями використані високі механічні і пружні властивості монокристалів. Поєднання цих властивостей дозволило створити новий клас вітчизняних електромеханічних перетворювачів з монокристалічними резонаторами, адатними безпосередньо перетворювати механічні коливання в електричний сигнал.

3. Запропоновані математичні і фізичні моделі та схемні рішення, покладені в основу "струнного" варіанту тензореєстривного методу вимірювання електричних, механічних і теплових величин.

4. Розроблено методику моделювання роботи перетворювача і створено спеціальну установку для дослідження механічних і електричних властивостей кристалів у широкому діапазоні осьових напружень, частот і амплітуд поперечних коливань, збуджуваних в НК електростатичним або магнітоелектричним способом. Встановлені зв'язки параметрів вихідного тензосигналу з власними геометричними розмірами і параметрами пружності кристалів, їх механічним напруженням, амплітудою і частотою механічних коливань.

5. Розроблена технологія керуваного росту НК Si та Si-Ge, які завдяки своїй структурній досконалості, кристалографічній орієнтації, геометричним розмірам, електричним та тензоелектричним властивостям, широкому діапазону робочих температур можуть бути безпосередньо використані як монокристалічні резонатори вібраційно-частотних тензоперетворювачів. Встановлені зв'язки між умовами росту і властивостями кристалів. Можливість одержання НК із заданими властивостями вказує на перспективність вирішення більш широкого кола задач сенсорної техніки.

6. На основі аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень дані рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів

монокристалічних струн з НК. Визначальний вклад механічних напружень кристала в частоту механічних коливань проявляється при відношеннях довжини до діаметра в межах 200...500.

7. Створення вібраційно-частотних тензоперетворювачів передбачало розробку нових способів закріплення кінців кристала у вузлах і, відповідно, використання нових конструкційних матеріалів. Запропоновані способи дозволили досягти мінімальних розмірів резонаторів, а відтак, максимальної їх чутливості до деформації, підвищеної добротності, стабільності і надійності. Показана ефективність застосування зв'язувачів на основі склоцементів (ситалів), їх придатність для створення надійних спаїв кристала на різних матеріалах пружних елементів (підкладках). Композиція монокристалічний ЧЕ-склоцемент-монокристалічний ПЕ розширює функціональні можливості перетворювача при застосуванні в спеціальних областях техніки для досліджень статичних і швидкозмінних процесів.

8. Визначена специфіка побудови вимірювального генератора з електростатичним збудженням монокристалічного резонатора. Для забезпечення рівномірності амплітуди коливань резонатора розподіл збуджувачої сили по довжині кристала повинен бути максимально наближеним до синусоїдального закону, а збуджувачі імпульси повинні мати частоту основних коливань НК з мінімальним вмістом гармонік. Розроблений алгоритм і схеми реалізації каналів вимірювання частоти з підвищеними характеристиками. Запропоновані схемотехнічні рішення декількох варіантів електронних схем, у тому числі, оптоелектронну, адекватну забезпечити роботу ВПІ у складних умовах експлуатації.

9. Розроблені загальні прийоми побудови перетворювачів для вимірювання деформації, сили, тиску, прискорення, вібрації і температури. Запропоновані варіанти їх конструктивного оформлення з використанням універсального мініатюрного модуля-резонатора на базі тензочутливого НК.

10. Показано, що похибки вимірювання фізичних величин (при роботі ВПІ в схемі ВГ) знаходяться в межах 0,01...0,001 %.

11. Створені і впроваджені наступні перетворювачі, прилади і пристрої: перетворювач лінійних переміщень (а.с. N 545853); перетворювач тиску (а.с. N 587925); акселерометр (а.с. N 697934); пристрій для вимірювання різниці тиску (а.с. N 787921); струнний резонатор (а.с. N 960634); динамометр (а.с. N 1018701); гравіметр (а.с. N 1431525); датчик тиску (а.с. N 1458737); пристрій для вимірювання температури (а.с. N 1747944); приймач випромінювання для ІЧ-газоналізатора (заявка N 50044691/25 з рішенням про видачу патента Росії); пристрій для вимірювання температури (Повідомлення про видачу патента України N 5718); фотоселектричний перетворювач (заявка на патент N 930056631 від 22. 06.93 р.); напівпровідниковий термоанемометр (заявка N 9409852 від 05.09.94 р.).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Байцар Р.И. Измерительные преобразователи механических величин с полупроводниковыми терморезисторами на основе нитридных кристаллов - Кн.: Нитридные кристаллы для новой техники, Воронеж, ВПИ, 1979. - С.177-180.

2. Байцар Р.И. Використання терморезистивних властивостей напівпровідникових НК для вимірювання лінійних переміщень // Вісник Львів. політех. ін-ту "Електронна техніка та прилади". -1979. -N132. - С.59-62.

3. Байцар Р.И. Терморезистивный преобразователь линейных перемещений // ПТЭ. -1980. - N3. - С.250.

4. Байцар Р.И., Дмитрук Ю.В. Датчик механических перемещений на основе терморезистивного эффекта в НК // Вестник Львов. политех. ин-та "Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем". - 1981. - N152. - С.9-11.

5. Байцар Р.И., Дмитрук Ю.В., Красножонов Е.П., Шелейник Ю.С.

Анемометрический преобразователь скорости потока на основе нитевидных кристаллов // ПСУ. - 1982. - №10. - С.18-19.

6. Байцар Р.И., Дмитрук Ю.В., Красножонов Е.П. Термоанемометр на нитевидных монокристаллах // Вестник Львов. политех. ин-та "Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем". - 1982. - №161. - С.6-10.

7. Байцар Р.И., Дмитрук Ю.В. Исследование динамических свойств терморезистивного датчика перемещений // Там же. - 1983. - №176. - С.5-8.

8. Красножонов Е.П., Байцар Р.И., Нечипорук И.Е., Решетило А.П., Дешинский Ю.Д. Виброчастотный тензопреобразователь - новый класс чувствительных элементов на основе полупроводниковых монокристаллов // Там же. - 1984. - № 186. - С.68-86.

9. Красножонов Е.П., Байцар Р.И., Ахроменко Ю.Г. Физические основы работы виброчастотных тензопреобразователей на основе нитевидных кристаллов // Физ. электроника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. - Львов, 1985. - Вып.31. - С.32-35.

10. Красножонов Е.П., Ахроменко Ю.Г., Байцар Р.И., Нечипорук И.Е. Тензочувствительный сигнал струнного резонатора при колебаниях // Контрольно-измерительная техника. Республ. межвед. научн.-техн. сб. - Львов, 1986. - Вып.39. - С.40-43.

11. Ахроменко Ю.Г., Байцар Р.И., Красножонов Е.П. Расчет характеристик чувствительных элементов с виброчастотными тензопреобразователями // Вестник Львов. политех. ин-та "Теория и проектирование полупроводниковых и радиоэлектронных устройств и систем". - 1986. - №206. - С.5-7.

12. Красножонов Е.П., Байцар Р.И., Решетило А.П., Агиенко Е.И. Измерительное устройство с виброчастотным тензопреобразователем // Там же. - 1988. - №226. - С.123-125.

13. Воронин В.А., Красножонов Е.П., Байцар Р.И. Виброчастотный

преобразователь на нитевидном монокристалле кремния.- Кн.: Микроэлектроника-99, Ботевград (Болгария), Д.П.Валентин-Андреев, 1999.- С.36-41.

14. Байцар Р.И., Красножонов Е.П., Решетило А.П. Электромеханические преобразователи на основе НК твердого раствора германий-кремний.-Кн.: Исследование и применение твердых растворов кремний-германий, Баку, ЭЛМ, 1989. - С.96-102.

15. Baitsar R.I., Voronin V.A., Krasnogonov E.P., Bogdanova N.K. Application of microelectronic technologies in string sensors production // Intern. Annual School Research Laboratory on Semiconductor and Hybrid Technologies, Sofia, Bulgaria, IMEE, 1989. -P.120-124.

16. Bogdanova N., Baitsar R., Voronin V.,Krasnogonov E. Single-crystal silicon resistors as sensitive elements for sensors// Intern. Annual School with Posters on Microelectronic Sensors and Semiconductor Lasers, Sozopol, Bulgaria, Technical University, 1990. - P.86-92.

17. Байцар Р.И., Красножонов Е.П., Горобей В.Н. Полупроводниковый вибро-частотный датчик давления// Метрология. - 1991. - №5. - С.32-36.

18. Воронин В.А., Байцар Р.И., Красножонов Е.П. Струнные датчики на основе монокристаллических кремниевых нитей.- Кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения. Сенсорная электроника, Новосибирск, НЭТИ, 1991. - С.55-59.

19. Baitsar R., Voronin V., Krasnogonov E., Bogdanova N. Operation of monocrystalline silicon resonator in a measuring circuit // Sensors and Actuators. - 1992. - A,30. -P.175-178.

20. Байцар Р.И., Ахроменко Ю.Р., Красножонов Е.П. Расчет вибро-частотного тензопреобразователя давления// Известия Вузов. Приборостроение. - 1992. - №3-4. - С.57-60.

21. Voronin V.A., Baitsar R.I., Krasnogenov E.P. Physical basis of semiconductor vibration frequency piezoresistive transducers. - Кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения, Новосибирск, ИЭТИ, 1993. - С.12-16.

22. Красножонов Е.П., Байцар Р.И. Чувствительные элементы датчиков с резонаторами на упругих колебаниях полупроводниковых монокристаллических струн // Междуг. сборник "Датчики систем измерения, контроля и управления". Пенза, ИИИ, 1992. - С.50-52.

23. Baitsar R., Krasnogenov E., Abbasov S. Semiconductor vibrational frequency-response sensor for pressure measurement // Физика и техника высоких давлений. - 1993. - №2, т.3. - С.25-27.

24. Baitsar R., Voronin V., Krasnogenov E., Bogdanova N. Semiconductors string pressure sensors // Sensors and Actuators. - 1993. - Vol. A.39. - №2. - P.125-128.

25. Варшава С.С., Островська А.С., Байцар Р.И. Морфологія і структура голчастих кристалів твердого розчину кремній-германій // УЖ - №2, т.39. - 1994. - С.230-233.

26. Байцар Р.И., Варшава С.С., Потапчук Г.Н., Чекурин В.Ф. Новые термоанемометрические датчики на основе НК // ПТЭ. - 1994. - №3. - С.158-163.

27. Байцар Р.И., Островська А.С. Визначення кінетичних коефіцієнтів кристалізації ниткоподібних кристалів сплаву Si-Ge // Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв". - 1994. - №280. - С.3-5.

28. Байцар Р.И., Красножонов Е.П., Рак В.С., Нечипорук І.Б. Аналіз роботи електронної схеми напівпровідникового струнного термометровпорядка // Вимірювальна техніка та метрологія. - 1994. - №51. - С.7-10.

29. Красножонов Е.П., Байцар Р.И., Рак В.С. О влиянии геометрических и технологических параметров на качество чувствительных эле-

ментов струнных датчиков. -Кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения, Новосибирск, НГТУ, 1994. - С.119-121.

30. А.с. N545853. Преобразователь линейных перемещений/ А.В.Сандулова, Е.Л.Долгов, Р.И.Байцар, В.К.Дугаев, З.В.Новаковская.

31. А.с. N587825. Преобразователь давления / А.В.Сандулова, Е.Л.Долгов, Р.И.Байцар В.К.Дугаев, З.В.Новаковская.

32. А.с. N697934. Акселерометр/ Р.И.Байцар, А.П.Решетило, А.А.Новиков.

33. А.с. N787921. Устройство для измерения разности давлений/ Р.И.Байцар, А.А.Новиков, А.П.Решетило.

34. А.с. N960634. Струнный резонатор / С.Г.Калинин, Е.П.Красноженов, Р.И.Байцар, Ю.В.Дмитрук, В.В.Господаревский.

35. А.с. N10116701. Динамометр/ Г.С.Писаренко, С.Г.Калинин, Р.И.Байцар, Ю.В.Дмитрук, Е.П.Красноженов, Г.М.Схрименко.

36. А.с. N1431525. Гравиметр/ Ю.И.Михеев, А.Т.Струков, Р.И.Байцар, Е.П.Красноженов.

37. А.с. N1458737. Датчик давления /Е.П.Красноженов, Р.И.Байцар, Ю.Г.Ахромченко, В.Н.Горобей, Д.В.Танаев, В.И.Лавский.

38. А.с. N1524773. Способ изготовления струнных электромеханических резонаторов/ Е.П.Красноженов, Р.И.Байцар, Ю.Г.Ахромченко, А.П.Решетило, Г.В.Катаева.

39. А.с. N1565088. Способ выращивания нитевидных кристаллов кремния/ А.С.Островская, В.А.Воронин, Р.И.Байцар, Е.П.Красноженов, А.Г.Мустафин.

40. А.с. N1747944. Устройство для измерения температуры/ В.А.Воронин, Е.П.Красноженов, Р.И.Байцар, А.В.Родионов, А.Н.Жирков, Н.Л.Маковский.

41. Заявка N5004691/25/0573397 від 1.07.91 р. Приймач випромінювання для ІЧ-газоаналізатора/ Н.К.Богданова, Р.І.Байцар, В.О.Воронін, Е.П.Красноженов, Ф.І.Філіпов. Рішення про видачу патента Росії

від 15.06.94 р.

42. Заявка №4260816 від 8.07.93 р. Пристрій для вимірювання температури/ В.О.Воронін, Є.П.Красножонов, Р.І.Байцар, А.Е.Родионов, С.М.Жирков, М.Л.Маковський. Повідомлення про видачу патента України N 5718.

43. Красножонов Є.П., Байцар Р.И., Дмитрук Ю.В. Виброчастотний тензопреобразователь на основе нитевидного монокристалла кремния // Расп. тез. докл. Всес. конф. "Датчики на основе технологии микроэлектроники". Москва, МДНП, 1983. - С.86-89.

44. Красножонов Є.П., Байцар Р.И., Ахроменко Ю.Г. Особенности расчета вибросистемных тензопреобразователей// Тез. докл. X Всес. конф. "Тензометрия-89". Москва, ИМАШ, 1989. - С.78.

45. Красножонов Є.П., Байцар Р.И., Горалин Р.А. Миниатюрные электромеханические управляемые резонаторы// Тез. докл. I Всес. конф. "Актуальные проблемы технологии композиционных материалов и радиокомпонентов микроволновых ИС". Киев, 1990. - С.56.

46. Байцар Р.И., Воронин В.А., Красножонов Є.П., Шилейкио Ю.С. Новые чувствительные элементы датчиков для гипербарокомплексов // Тез. докл. Всес. школы по техническим средствам и методам освоения мирового океана. Москва, ИО АН, 1991.- С.6.

47. Байцар Р.И., Гий Я.Е., Нечипорук И.Е., Решетило Г.П. Механические и тензометрические свойства монокристаллов твердого раствора Si-Ge // Тез. докл. VIII коорд. совещанию по исследованию и применению сплавов Si-Ge. Ташкент, "ФАН", 1991. -С.39.

48. Воронин В.А., Байцар Р.И., Красножонов Є.П., Островская А.С. Влияние технологических факторов на рост нитевидных кристаллов кремния р-типа для струнных преобразователей // Расп. тез докл. VIII Всес. конф. по росту кристаллов. Харьков, Ин-т монокристаллов, 1982. - С.286-287.

49. Островская А.С., Байцар Р.И., Островский И.П., Мачулина

Е.С. Особенности выращивания нитевидных кристаллов сплава Si-Ge для струнных сенсоров // Теа. докл. школы-семинара "Редаксационные явления в твердых телах". Воронеж, ВПИ, 1993. - С.156.

50. Baitsar R.I., Varshava S.S., Ostrovskaya A.S., Kuchma V.I. Mechanical properties of the Si-Ge alloy whiskers// Abstracts. Eighth Intern. Conf. on Fracture (ICF-8), Kiev. Academy of Sciences of Ukraine PMI, 1993. - P.670.

51. Байцар Р.И., Варшава С.С., Островська А.С., Кучма В.І. Дослідження процесів кристалізації сплавів кремній-германій// Теаи доп. IV Міжн. конф. з фізики і технології тонких плівок. Івано-Франківськ, ІУ ім. В.Стефаника, 1993.- С.259.

52. Abbasov S.M., Baitsar R.I., Agaverdieva G.T. The use of semiconductive string tensotransducers on the basis of $Ge_{1-x}Si_x$ solid solutions for the control of ecological parameters// Abstracts of 2-nd Baku Intern. Symposium on energy, ecology, economy. Ifan, Tabriz University, 1993. - P.123.

53. Байцар Р.И. Особенности построения и пути улучшения параметров полупроводниковых вибрационно-частотных чувствительных элементов// Теа. докл. междуна. научн.-техн. конф. "Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления", Пенза, ЦДНП, 1994. -С.15-18.

54. Байцар Р.И., Варшава С.С., Красноженов Є.П., Островська А.С. Електромеханічні теплові та фотоелектричні перетворювачі на базі монокристалів Si-Ge // Теаи доп. I міжн. конф. "Матеріалознавство алмазоподібних і калькогенідних напівпровідників". Чернівці, ЧДУ, 1994. - С.206.

55. Байцар Р.И. Напівпровідниковий струнний термперетворювач// Теаи доп. У наук.-техн. конф. "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань". Харків, ДНВО "Метрологія", 1994. - С.175.

56. Байцар Р.И. О возможности применения полупроводниковых резонансных сенсоров для исследования материалов и строительных конструкций // Тез. докл. межд. научно-практической конф. "Совершенствование стройматериалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях". Сумы, ССИ, 1994. - С.280.

57. Байцар Р.И., Красноженов С.П., Нечипорук І.Є., Фадеев С.В. Технологічні аспекти проблеми виготовлення електромеханічних резонаторів вібраційно-частотних перетворювачів // Тези доп. конф. з міжнародн. участю "Приладобудування-94". Вінниця, ВПІ, 1994. - С.103.

Байцар Р.И. Разработка полупроводниковых вибрационно-частотных сенсоров и оптимизация их характеристик. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.03 - Технология, оборудование и производство материалов и устройств электронной техники. Государственный университет "Львівська політехніка". Львов, 1995 г. Рукопись. Защищено 44 научных труда, 11 авторских свидетельства, 2 решения на выдачу патентов, 3 заявки на изобретения с приоритетом Госпатента Украины, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных вопросам создания новых типов полупроводниковых измерительных преобразователей. Построены и исследованы физические и математические модели преобразователей. Изложены конструктивно-технологические и схемотехнические методы создания рациональных конструкций преобразователей для измерения сил, давлений, ускорений, температуры, скорости потока и др. физических величин. Показано, что в связи с улучшенными метрологическими и эксплуатационно-функциональными характеристиками указанные преобразователи представляют интерес для современного приборостроения. Разработанные датчики прошли апробацию и внедрение экспериментальных и опытных образцов.

Baitsar R.I. Elaboration of semiconductor vibration - frequency sensors and optimization of their characteristics. The scientific work is a manuscript to submit one's thesis for Doctor's scientific degree in technical sciences in speciality 05.27.03 - Technology, equipment and production of materials and arrangements of the electronic technique. State university "Lvivska politechnica", Lviv, 1995. 44 scientific papers, 11 (patents) author's certificates, 2

resolutions on the patents, 3 applications for the invention with priority of Ukraine State Patent, that contain the results of the theoretical and experimental investigations and are devoted to the problems of the new type semiconductor measurement transducers. Physical and mathematical models of the transducers have been made. They were based on the direct transformation of the mechanical oscillation of the monocrystal string into the frequency's electrical signal. There were given an account of constructionally-technological and schematically - technical methods of creation of the transducers for strength, pressure, acceleration, temperature, flow velocity and other physical fields measurements. It was shown that in cosequence of improvement of "the metrological and functional characteristics these transducers are interesting for modern device. The developed sensors passed an evalution tests, some experimental specimens were adopted.

Ключеві слова: технологія, напіпровідник, ниткоподібний кристал, чутливий елемент, перетворювач, вимірвальний генератор.

АВ 33.156

Підписано до друку 20. 09. 95. Формат 60×84¹/₁₆.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 2,5. Тираж 100. Зам. 843.
Друк. ПТУ № 58. 290008, Львів, Ів. Федорова, 9.