

УДК 623.004.67

К.Е. Тихомирова, А.М. Науменко

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ І ГІРОСКОПІВ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

*Розглянуті методологічні недоліки існуючих мікромеханічних гіроскопів. Приводиться принцип дії високоточних ВП кутової швидкості (гіроскопів), що базується на використанні поверхневих акустичних хвиль (ПАХ)*

**Ключові слова:** *гіроскоп, швидкість, ПАХ.*

### Вступ

**Постановка задачі.** Мікромеханічні вимірювальні перетворювачі (ВП) кутової швидкості, зокрема мікромеханічні гіроскопи (ММП) використовуються для вимірювання параметрів руху об'єктів в системах управління, збору і обробки інформації. Область їх застосування – системи навігації, управління польотами, стабілізації платформ, робототехніка та ін., де необхідна висока точність і надійність. Тому виникає актуальна потреба у аналізі недоліків існуючих гіроскопів, а також у застосуванні нових принципів побудови даних приладів.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1-6] розглядаються мікромеханічні гіроскопи та гіроскопи на поверхневих акустичних хвилях, але в цій літературі не проводиться порівняльний аналіз цих приладів, що вельми важливо в процесі експлуатації цих видів гіроскопів.

**Метою статті** є дослідження методів роботи мікромеханічних гіроскопів та гіроскопів на поверхневих акустичних хвилях, похибок, що виникають у процесі вимірень та їх вплив на результати визначення швидкості, проведення порівняльного аналізу.

### Основний матеріал

На сьогоднішній день поширені ММГ на основі кремнію. Однак конструкція і технологія цих виробів на кремнію є складною і дорогою. Існуючі ММГ в значній мірі повторюють свої макромеханічні ана-

логи, у тому числі їм властиві всі відомі методологічні недоліки механічних приладів, пов'язаних з наявністю пружних механічних підвісів. Проводяться також інтенсивні розробки мікроелектромеханічних систем (МЕМС) на основі других видів матеріалів: п'єзокварцу, карбіду кремнію, нітридних та поліамідних плівок, а в перспективі – на основі плівок Ленгмюра-Блоджата та нанотрубок.

Мікромеханічний гіроскоп на основі кремнію представляє собою закріплену на торсіонах пластину, яка здійснює вимушені коливання на власній резонансній частоті під дією сигналу, що подається на драйвер (як правило електростатичний). При зовнішньому повертанні ММГ виникає сила Кориоліса, яка створює коливання відносно вимірювальної осі. При цьому зазор між рухомою масою ММГ та основою міняється, що призводить до зміни відстані між електродами та ємності між ними. Вимірюючи зміну ємності, можливо визначити кутову швидкість обертання ММГ.

Відомий ряд розробок ММГ, що поставляються на ринок закордонними виробниками, наприклад фірмою «AnalogDevices» (США), однак в нашій країні на сьогодні немає завершених розробок та серійного виробництва подібних приладів. Тим не менше існуюча технологічна база практично повністю дозволяє здійснювати розробку та виготовлення мікрогіроскопів та ВП прискорення на кремнієвій технології. Ключовими технологічними операціями при цьому є керуємі вакуумні, плазмохімічні та фотолі-

тографічні процеси. Ці технологічні процеси та обладнання в значній мірі визначають якість створених гіроскопів.

Оригінальним рішенням проблеми створення недорогих високоточних ВП кутової швидкості (гіроскопів) є принцип роботи, що базується на використанні поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), що забезпечує простоту конструкції, відсутність рухомих конструктивних елементів, широку смугу частот вимірювальних сигналів.

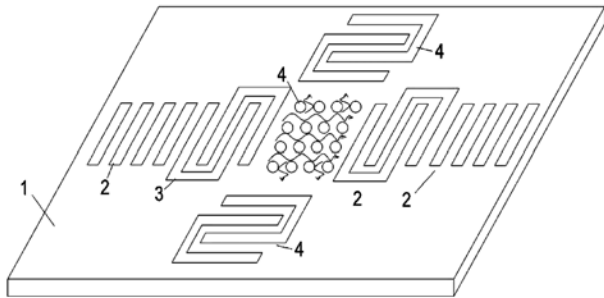


Рис. 1. Структура гіроскопа на поверхневих акустичних хвилях:

1 – п'єзоелектричний кристал; 2 – відзеркалюючі решітки; 3 – зустрічно-штирвовий перетворювач драйвера; 4 – зустрічно-штирвовий перетворювач вимірювального пристрою; 5 – додаткові інерційні маси

Конструкція мікрогіроскопа на ПАХ схематично задана на рис.1. Мікрогіроскоп виготовляється на п'єзоелітріці 1 з ніобіту літію або з другого п'єзоелектрика. На поверхні п'єзоелітріці на основі зустрічно-штирвового перетворювача (ЗШП) драйвера формуються двооходовий резонатор на ПАХ 3 з відзеркалюючими решітками 2.

Перпендикулярно до осі розповсюдження акустичної хвилі розташовані два вихідних ЗШП 4 вимірювального пристрою. В центральній частині резонатора розміщена двомірна матриця додаткових інерційних мас 5. Кожна інерційна маса являє собою плівковий фрагмент круглій, квадратній або будь-якої форми з того ж матеріалу, що й ЗШП, або з більш важких металів. Геометричний період плівкових фрагментів інерційних мас рівняється або кратний половині довжини акустичної хвилі.

Принцип дії мікрогіроскопа на ПАХ полягає в наступному. Резонатор за рахунок зовнішнього генератора збуджує стоячу поверхневу акустичну хвилю за максимумом інтенсивності коливань в зоні інерційних мас. Завдяки цьому система, що складається з інерційних мас, і поверхневого шару п'єзоелектрика, що прилягає до неї, перетворюється в коливаний рух з частотою резонатора. При обертотому русі всієї системи виникають сили Кориоліса, що прикладені до коливаних мас та матеріалу поверхневого шару п'єзоелектрика, під дією яких коливачи інерційні маси та коливачий матеріал

при поверхневого шару п'єзоелітріці збуджує вторинну поверхневу акустичну хвилю за напрямком, що перпендикулярна первинній хвилі. Розташований у відповідному напрямку ЗШП формує при цьому вихідний сигнал, що пропорційний величині кутової швидкості.

Першорядний вплив на точні характеристики мікрогіроскопа на ПАХ надає вибір матеріалу підкладки.

На рис. 2 наведені нормовані залежності амплітуд ПАХ від частоти для найбільш розповсюджених в акустоелектроніці матеріалів – кварця та необатлітію. Отже як буде наведено далі, чутливість мікрогіроскопа на ПАХ збільшується зі збільшенням частоти, те, як показує рис. 2 доцільно в якості матеріалу підкладки використовувати неobat літію.

На рис. 3 схематично представлені характеристики ПАХ – довжина хвилі, амплітуда та довжина області розповсюдження коливань. Між цими характеристиками існують наступні співвідношення:  $\alpha \cong 2\lambda$ ;  $A \cong 0,01\lambda$ ;  $d_{ap} \cong 100\lambda$ . На частотах приблизно 1ГГц для ніобіту літію  $\lambda \cong 4 \times 10^{-6}$  м.

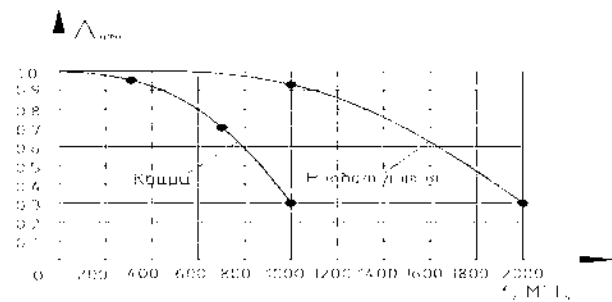


Рис. 2. Нормовані амплітудо-частотні характеристики п'єзоматеріалів

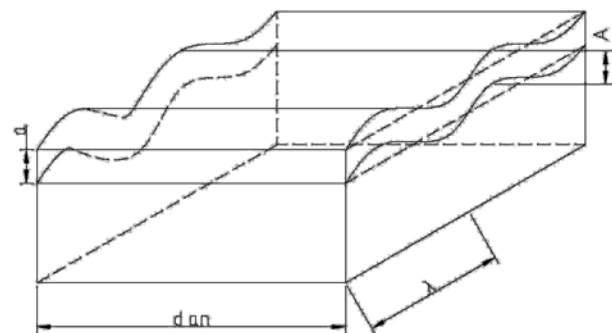


Рис. 3. Характеристики поверхневих акустичних хвиль:  $\lambda$  – довжина хвилі;  $\alpha$  – товщина матеріалу, в межах якої розповсюджується хвиля;  $A$  – амплітуда ПАХ;  $d_{ap}$  – апертура

Накопичений досвід робіт з технології керуємих вакуумних та плазмохімічних процесів, виготовлення акустоелектронних виробів на поверхневих та об'ємних акустичних хвилях з використанням нового покоління обладнаних для іонохімічної обробки (МІХО-1), оснований на електронно-

циклотронному резонансі, дозволяє стверджувати, що технології, які використовуються, забезпечують високу точність отримання електронних структур.

На базі вказаних технологічних процесів та обладнання можливе проектування та виготовлення нового покоління ВП кутової швидкості на ПАХ. Це, в свою чергу, дає основу вважати, що можливо успішно справитись з поставленою задачею забезпечення розробників апаратури вітчизняними дешевими, чутливими та високочастотними ВП кутової швидкості. Застосування гіроскопів на ПАХ дасть можливість вирішити проблему імпортозаміщення.

Конструктивно в кожному мікрогіроскопі необхідно виділити дві основні частини: драйвер та чуттєвий елемент. Розглянемо основні відмінності мікрогіроскопа на ПАХ від ММГ.

*Мікрогіроскоп на ПАХ.* Основними особливостями гіроскопа на ПАХ є: збудження стоячої хвилі; введення коригуючого контуру зворотного зв'язку для усунення перехресних зв'язків.

Драйвер конструктивно уявляє собою ЗШП з генератором та має яскраво виражений резонанс.

Чуттєвий елемент (кварцева пластина) в робочій частині частот не має резонансу, тому в достатньо широкому діапазоні його математична модель може бути представлена коефіцієнтом посилення. Таким чином, математична модель гіроскопа на ПАХ може мати нульовий порядок:

$$cx = F_K,$$

де  $F_K = 2A_1v_1\omega_{\text{вим}}\cos(v_1t)$  – сила Коріоліса;  $c$  – жорсткість матеріалу підкладки;  $A_1, v_1$  – амплітуда і частота ПАХ відповідно;  $\omega_{\text{вим}}$  – вимірювана кутова швидкість. Амплітуда вихідного сигналу:

$$x_\alpha = 2A_1\omega_{\text{вим}}v_1/c.$$

Отже, з приростом робочої частоти  $v_1$  чутливість гіроскопа на ПАХ підвищується.

*Мікроемеханічний гіроскоп.* Математична модель ММГ на кремнію в першому приближенні є рівнянням другого порядку:

$$2\xi\sqrt{c}x + cx = F_K,$$

де  $\xi$  – коефіцієнт затухання,  $c$  – жорсткість матеріалу підкладки;  $F_K = 2A_2v_2\omega_{\text{вим}}\cos(v_2t)$  – сила Коріоліса,

$A_2; v_2$  – амплітуда та частота коливань драйверу відповідно;  $\omega_{\text{вим}}$  – вимірювана кутова швидкість.

Математична модель ММГ враховує динаміку мас, підвішених на торсіонах, тому амплітудно-частотна характеристика має яскраво виражений екстремум. При цьому драйвер (електричний двигун) в робочій області частот немає резонансу, а чуттєвий елемент (кремнієва структура) має резонанс. На резонансній частоті чуттєвого елемента  $v_p$ , яка визначається з рівняння  $v_p^2 = c$ , амплітуда  $x_\alpha$  вихідного сигналу рівна:  $x_\alpha = \frac{A_2\omega_{\text{вим}}}{\xi v_p}$ .

Тобто зі збільшенням робочої резонансної частоти  $v_p$  чуттєвість мікроемеханічного кремнієвого гіроскопа зменшується.

## Висновки

1. Фізичні процеси, що супроводжують роботу гіроскопу на ПАХ та дослідження його спрощеної моделі, виявляє принципові відмінності в функціонуванні традиційних мікроемеханічних гіроскопів та гіроскопів на ПАХ.

2. Показано, що в певному діапазоні кутових швидкостей чуттєвість гіроскопа буде збільшуватися з підвищенням частоти ПАХ.

## Список літератури

1. Поліщук Э.С. *Вимірювальні перетворювачі* / Э.С. Поліщук. – Вища школа, 2003. – 180 с.
2. Фарсане Н.Г. *Технологічні виміри й прилади* / Н.Г. Фарсане, Л.В. Ілясов. – Г.: Вища школа, 1999. – 340 с.
3. Павловський М.А. *Теорія гіроскопів: Підручник для ВУЗів.* / М.А. Павловський. – К.: Вища Школа, 1986. – 220 с.
4. *Основи метрології й електричні вимір.* – Г.: Энергоатом издат, 1987 – 370 с.
5. Євтіхєєв М.М. *Вимір електричних і неелектричних величин* / М.М. Євтіхєєв та інші. – Г., Энергоатом издат, 1988. – 210 с.

Надійшла до редколегії 12.02.2013

**Рецензент:** д-р техн наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ГИРОСКОПОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

К.Е. Тихомирова, А.Н. Науменко

*Рассмотрены методологические недостатки существующих микромеханических гироскопов. Приводится принцип действия высокоточных ИП угловой скорости (гироскопов), которые основаны на использовании поверхностных акустических волн.*

**Ключевые слова:** гироскоп, скорость, ПАВ.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MICROMECHANICAL GYROSCOPES AND GYRO SURFACE ACOUSTIC WAVE

K.E. Tikhomirova, A.N. Naumenko

*The metodologic lacks of existent micromechanic gyroscopes are considered. Principle over of action of high-fidelity IP of angulator (gyroscopes) is brought, which are based on the use of superficial acoustic waves.*

**Keywords:** gyro, speed, SAW.