



ДЛЯ ВУЗОВ

---

*В.Я. Распопов*

# МИКРО- МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

*Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Приборостроение" направления подготовки «Приборостроение»*



---

МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
2007

УДК 531.383-11 (075.3)

ББК 34.9 я 73

P24

**Рецензенты:**

кафедра «Автоматизированные комплексы систем  
ориентации и навигации» Московского авиационного института  
(Гос. техн. университет)

зав. каф. чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф. Б.С. Алешин,  
засл. деятель науки и техники РФ, лауреат Гос. премии СССР,  
д-р техн. наук, проф. В.М. Суминов, д-р техн. наук, проф. В.А. Иванов,  
д-р техн. наук, проф. К.В. Подмастерьев

**Распопов В.Я.**

P24 Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение,  
2007. – 400 с.: ил.

ISBN 5-217-03360-6

Изложены терминология, классификация, конструкции и принципы работы микромеханических осевых и маятниковых акселерометров, датчиков давления и гироскопов LL-, LR- и RR-типов. Даны описание и расчет прямых (датчиков перемещений и деформаций) и обратных (датчиков сил и моментов) преобразователей в микромеханическом исполнении, схемы электронной обработки сигналов.

Приведены примеры электронного устранения ошибок микрогироскопов, в частности квадратурной; описана электронная частотная настройка режимов работы микрогироскопов. Рассмотрены конструктивные схемы и расчет упругих подвесов и мембран, динамика чувствительных элементов, включающая уравнения движения, передаточные функции, частотные характеристики и функциональные зависимости перемещений чувствительных элементов от измеряемой величины. Даны расчет газового и конструкционного демпфирования, теория и расчет измерительных цепей приборов прямого и компенсационного преобразований, а также основные погрешности измерений, примеры вычислений.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Приборостроение» направления подготовки «Приборостроение», а также может быть полезно аспирантам и инженерно-техническим работникам.

УДК 531.383-11 (075.3)

ББК 34.9 я73

**ISBN 5-217-03360-6**

© Распопов В.Я., 2007

© Издательство «Машиностроение», 2007

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,  
опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и  
со ссылкой на источник информации

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ ...</b>	9	<b>Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ</b>	
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	10	<b>ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	12	<b>МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ....</b>	83
<b>Глава 1. КОНСТРУКЦИИ И</b>		2.1. Материалы .....	83
<b>ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ</b>		2.1.1. Кристаллы. Символы	
<b>МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ</b>		граней и направлений	83
<b>ПРИБОРОВ .....</b>	18	2.1.2. Кремний .....	86
1.1. Акселерометры .....	18	2.1.3. Арсенид галлия .....	97
1.1.1. Основные определения	18	2.1.4. Кремниевые компанды	99
.....		.....	99
1.1.2. Осевые микроакселерометры	19	2.1.5. Металлы .....	101
.....		2.2. Выращивание и депонирование тонких пленок	104
1.1.3. Маятниковые микроакселерометры	27	2.2.1. Эпитаксия .....	104
.....		2.2.2. Диффузия .....	106
1.2. Датчики давления .....	35	2.2.3. Ионная имплантация	108
1.2.1. Основные определения	35	2.3. Литография .....	108
.....		2.3.1. Фотолитография .....	108
1.2.2. Чувствительные элементы микродатчиков давления	36	2.3.2. Электронно-лучевая литография .....	111
.....		2.3.3. Рентгеновская литография	113
1.2.3. Базовые конструкции микродатчиков давления	40	.....	113
.....		2.4. Травление .....	113
1.3. Гироскопы .....	47	2.4.1. Изотропное травление	114
1.3.1. Основные определения	47	.....	114
.....		2.4.2. Анизотропное травление	115
1.3.2. Микрогироскопы LL-типа .....	49	.....	115
А. Одномассовые микрогироскопы	49	2.4.3. Другие виды травления	117
.....		.....	117
Б. Двухмассовые микрогироскопы	58	2.4.4. Контроль размерных параметров при травлении	118
.....		.....	118
1.3.3. Микрогироскопы LR-типа .....	61	2.5. Изготовление микроструктур .....	120
.....		2.5.1. Базовые технологии формообразования	120
1.3.4. Микрогироскопы RR-типа .....	66	2.5.2. Микроэлектронные элементы	130
А. Гироскопический момент и ЧЭ микрогироскопов	66	.....	130
.....		2.6. Сборка микромеханического прибора	131
Б. Конструкция микрогироскопов	73	.....	131
.....		2.7. Испытания механических свойств материалов микромеханических структур	134
1.3.5. Камертонные и волновые микрогироскопы	77	.....	134
.....		<b>Темы для самоконтроля .....</b>	142
<b>Темы для самоконтроля .....</b>	82		

<b>Глава 3. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ</b> .....	143	3.4. Электронные средства обработки сигналов микромеханических приборов	194
3.1. Упругие подвесы и мембраны .....	143	3.4.1. Микроакселерометры и микродатчики давления	195
3.1.1. Упругие подвесы микроакселерометров .....	143	А. Схемы с аналоговым выходом .....	195
А. Жесткость подвесов ....	143	Б. Схемы с частотным выходом .....	196
Б. Главные формы и частоты малых колебаний ЧЭ ...	149	В. Схемы с ШИМ на выходе .....	198
В. Влияние массы упругих элементов на частоту собственных колебаний .....	153	3.4.2. Микрогироскопы ....	201
3.1.2. Упругие подвесы микрогироскопов .....	154	А. Задачи, решаемые электронными средствами, и методы их реализации ....	201
А. Микрогироскопы LL-типа	154	Б. Режим движения .....	205
Б. Микрогироскопы RR-типа	155	В. Режим чувствительности	206
В. Влияние растягивающих сил на жесткость упругих элементов .....	159	Г. Обработка сигналов .....	208
3.1.3. Мембраны микродатчиков давления .....	160	<b>Темы для самоконтроля</b> .....	213
А. Мембрана одинаковой толщины .....	161		
Б. Мембрана с жестким центром .....	163	<b>Глава 4. ДИНАМИКА ЧЭ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ</b> .....	215
3.2. Прямые преобразователи .....	164	4.1. Уравнения движения ЧЭ микроакселерометров	215
3.2.1. Емкостные преобразователи перемещений ....	164	4.1.1. Осевой микроакселерометр .....	215
3.2.2. Преобразователь перемещений на МДП-транзисторе .....	168	4.1.2. Маятниковый микроакселерометр .....	220
3.2.3. Тензорезисторные преобразователи деформаций	170	4.2. Передаточные функции ЧЭ микроакселерометров	226
3.2.4. Преобразователи деформаций на поверхностно-акустических волнах и на струне .....	179	4.2.1. Осевой микроакселерометр .....	226
3.3. Обратные преобразователи (актюаторы) .....	180	4.2.2. Маятниковый микроакселерометр .....	230
3.3.1. Электростатические преобразователи .....	180	4.3. Уравнения движения и передаточная функция ЧЭ микродатчика давления ....	241
3.3.2. Магнитоэлектрические преобразователи .....	187	4.4. Газовое демпфирование ЧЭ микроакселерометров и микродатчиков давления .....	244
3.3.3. Электромагнитные преобразователи .....	192	4.5. Уравнения движения микрогироскопов .....	250
		4.5.1. Микрогироскопы LL- и LR-типа .....	250
		А. Обобщенные уравнения	250
		Б. Частные уравнения .....	261

4.5.2. Микрогироскопы RR-типа .....	264	5.1.2. Маятниковый микроакселерометр .....	327
А. Обобщенные уравнения	264	5.2. Микроакселерометры компенсационного преобразования .....	329
Б. Частные уравнения .....	266	5.2.1. Микроакселерометр с электростатической обратной связью .....	329
4.6. Электростатические силы и частотная настройка режимов колебаний микрогироскопов .....	268	5.2.2. Микроакселерометр с магнитоэлектрической обратной связью .....	335
4.7. Демпфирование ЧЭ микрогироскопов .....	277	5.3. Коррекция частотных характеристик .....	343
4.7.1. Газовое демпфирование .....	277	5.4. Ошибки измерения микроакселерометрами .....	346
4.7.2. Конструкционное демпфирование .....	279	5.5. Микродатчик давления прямого преобразования ...	348
4.8. Динамика гармонических осцилляторов .....	286	5.6. Микродатчики давления компенсационного преобразования .....	350
4.8.1. Линейные осцилляторы .....	286	5.6.1. Микродатчик давления с электростатической обратной связью .....	350
4.8.2. Влияние нелинейной упругости подвеса .....	293	5.6.2. Микродатчик давления с магнитоэлектрической обратной связью .....	353
4.9. Динамика ЧЭ маятниковых микроакселерометров .....	298	5.7. Формирование выходных сигналов микрогироскопов .....	355
4.9.1. Микроакселерометр на вибрирующем основании ...	298	5.7.1. Прямое преобразование .....	355
4.9.2. Микроакселерометр на поступательно перемещающемся основании .....	303	А. Микрогироскопы LR- и LL-типов .....	355
4.9.3. Первая и вторая формы колебаний маятникового ЧЭ на вибрирующем основании .....	305	Б. Микрогироскопы RR-типа .....	364
4.10. Динамика ЧЭ микродатчика давлений .....	312	5.7.2. Компенсационное преобразование .....	367
4.11. Динамика ЧЭ микрогироскопа .....	315	5.8. Зависимость измерительных свойств МГ от конструктивных параметров и внешних возмущений	369
<b>Темы для самоконтроля .....</b>	<b>321</b>	5.8.1. Масштабный коэффициент и частотная настройка .....	369
<b>Глава 5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ .....</b>	<b>322</b>	5.8.2. Зависимость частот, расстройки частот и масштабных коэффициентов от изменения геометрических размеров ротора и упругих элементов подвеса	373
5.1. Микроакселерометры прямого преобразования ...	323		
5.1.1. Осевой микроакселерометр .....	323		

---

5.8.3. Влияние линейной и угловой вибрации основания .....	377	5.9.3. Механический шум микроакселерометров и микродатчиков давления ...	387
5.8.4. Влияние ориентации упругих элементов подвеса на пластине монокристаллического кремния .....	381	5.9.4. Механический шум микрогироскопов .....	389
5.9. Шум в микромеханических приборах .....	384	<b>Темы для самоконтроля .....</b>	<b>392</b>
5.9.1. Происхождение теплового шума .....	384	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>393</b>
5.9.2. Происхождение механического шума .....	386	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>394</b>
		<b>СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>395</b>
		<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ....</b>	<b>397</b>