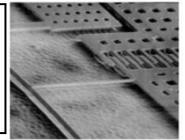




Санкт-Петербургский Государственный
Технический Университет

Лаборатория нано- и
микросистемной техники



«Типы и конструкции микроэлектромеханических систем»

Введение в микросистемную технику

Ю.Д.Акульшин

Вед.инженер НИЛ «НМСТ»

Санкт-Петербург - 2018

1. Введение. Назначение и структура дисциплины.
2. Сенсоры. Классификация сенсоров.
3. Актюаторы - микромеханические приводы движения.
4. Миниатюрные электрорадиомеханические и оптоэлектромеханические компоненты
5. Микромеханизмы, микропривод, микромашины
6. Аналитические микросистемы
7. Технологические микросистемы
8. Миниатюрные робототехнические системы

- Назначение и структура дисциплины.
- Краткая история развития и применений микро-
• наноэлектромеханических систем.
- Основы микроэлектромеханических систем.
- Основная терминология.

Микросистемы по цели функционирования:

- сенсоры – преобразователи внешнего физического воздействия в удобный для измерения (чаще электрический) сигнал;
- актюаторы (активаторы) – преобразователи управляющего (чаще электрического) воздействия в требуемое физическое;
- миниатюрные управляемые компоненты (микрореле, микрозеркала, затворы, фильтры и т. д.);
- микромашины и микромеханизмы – микроустройства, предназначенные для передачи и преобразования механической энергии (зубчатые передачи, рычаги, микродвигатели, микротурбины, транспортеры и т. д.);
- аналитические микросистемы – сложные микросистемы, предназначенные для диагностики и анализа (многосенсорные системы, микроспектрометры, биочипы и т. д.);
- технологические микросистемы – сложные микросистемы, предназначенные для производства, переработки и преобразования веществ (микролаборатории, микроинструменты, микрореакторы и т. д.);
- миниатюрные автономные микросистемы, микророботы (миниатюрные транспортные системы, микророботы для медицинских и других применений).

Микросистемы по иерархической структуре:

прямого преобразования энергии, сигнала с обратной связью
интегрированные с системой преобразования, накопления, обработки сигнала и управления (интеллектуальные);
распределенные, адаптивные (умные поверхности, нейророботные структуры).

Микросистемы по физической природе функционирования и преобразования энергии:

микромеханические, электромеханические;
пневно-, акустомеханические;
термоэлектромеханические;
оптоэлектромеханические;
микрофлюидные;
химико-биологические и т. д.

Классификация микросистемной техники

Компоненты микросистемной техники

(микродвигатели, микрореле, микровентили)

Комплексированные изделия микросистемной техники

(космические микро аппараты, микроспутники,)

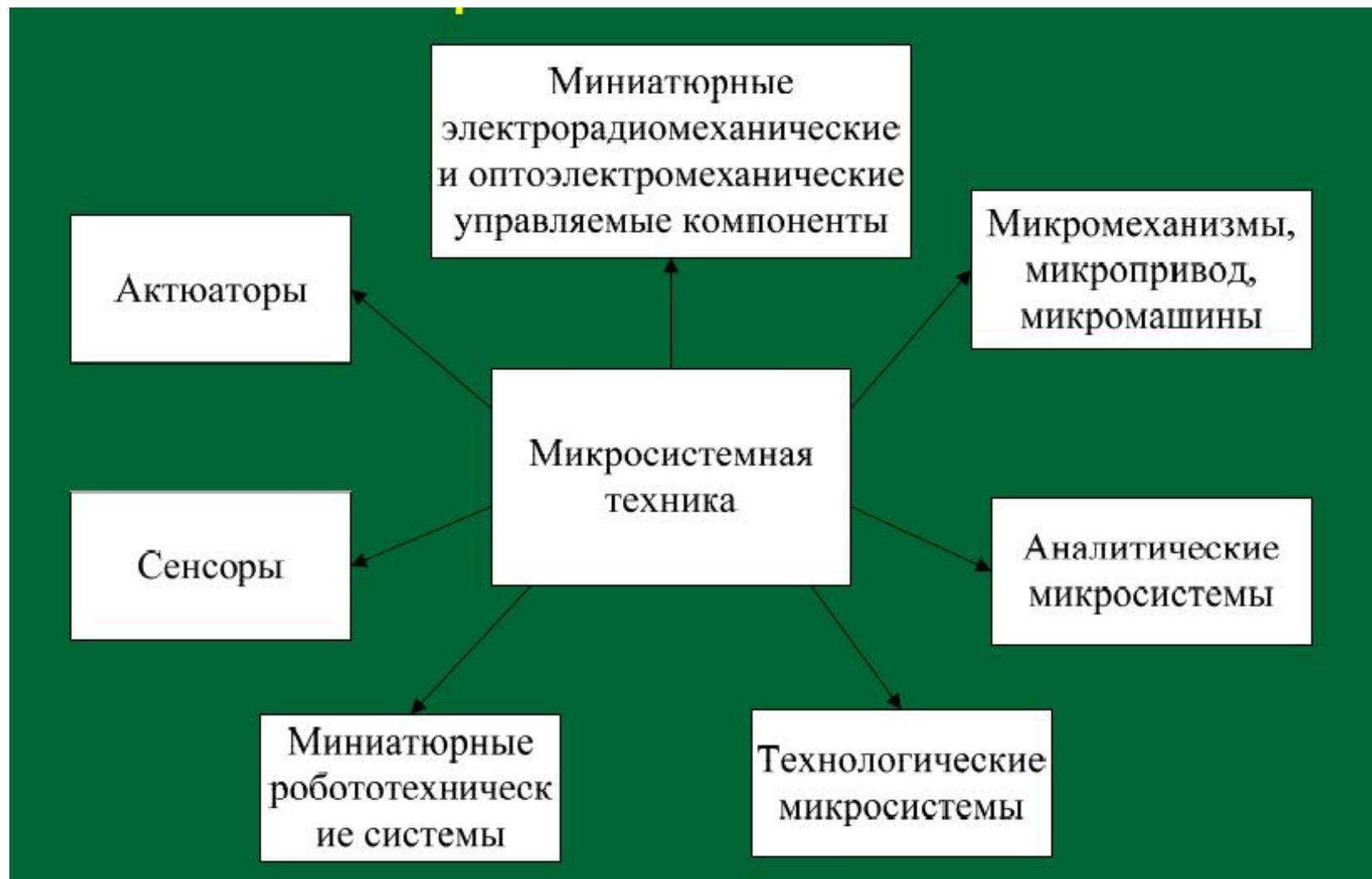
Узлы микросистемной техники

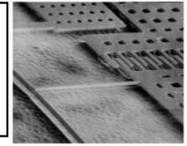
(микродвигатель, микроспектрометры угломеры)

Изделия микросистемной техники

(микровертолет, микроробот, микроракета)

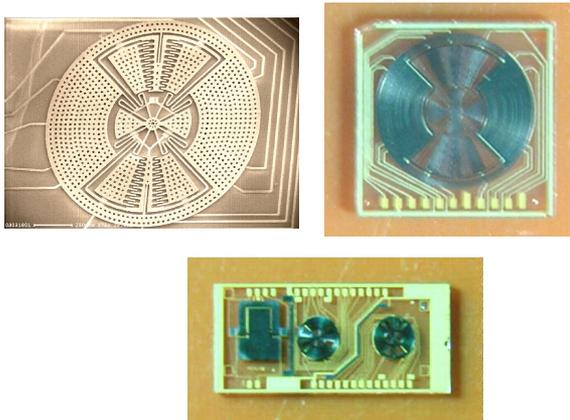




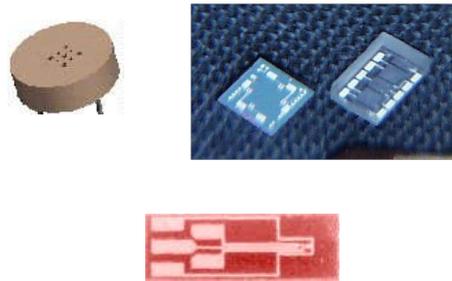


R&D Lab "Nano&MicroSystemsTechnologies"

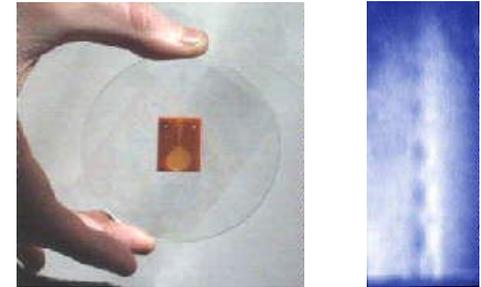
Inertial sensors



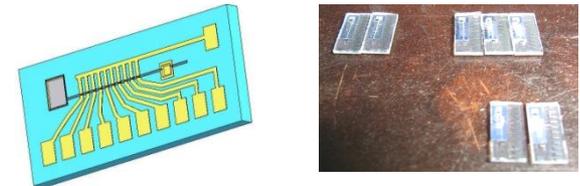
Pressure sensors



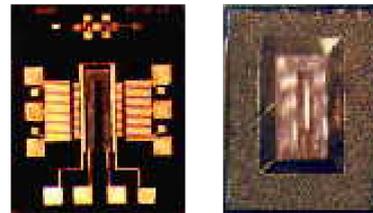
MicroNozzles



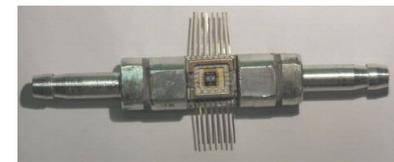
Mercury Micro Switch



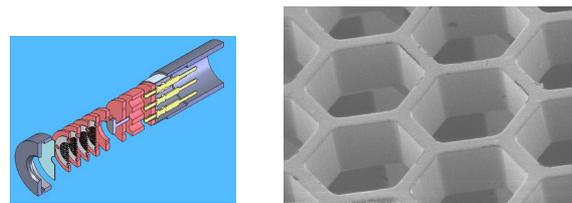
Thermal AC-DC converter



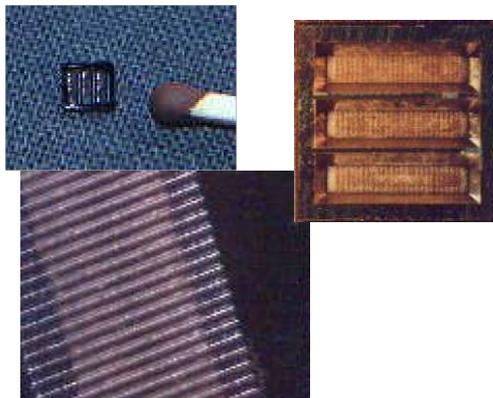
Heat Micro Flowmeter



Micro Analyzer



Diffusion leak for helium leakage



Микроэлектроника

Микротехнологии

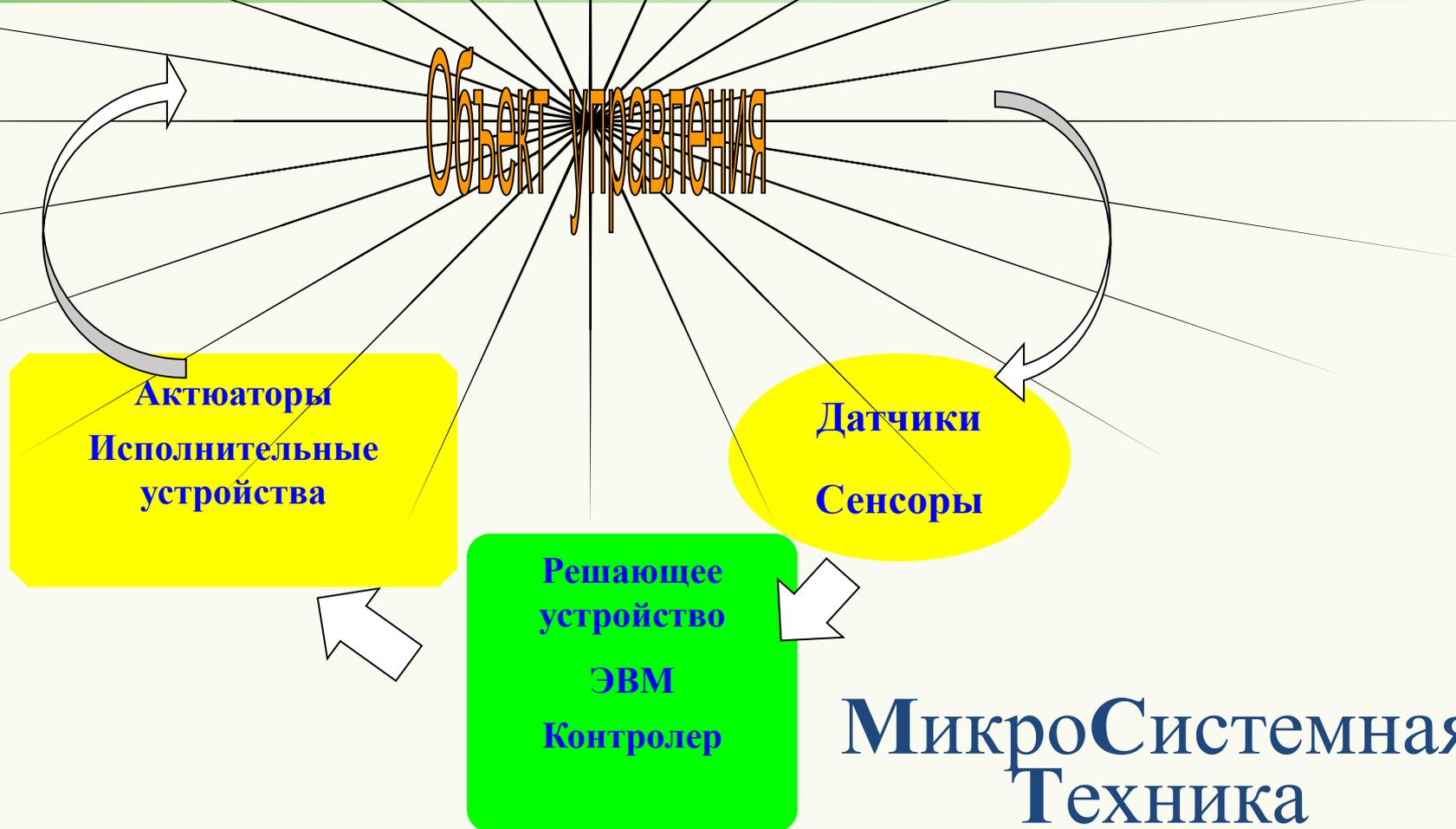
Объект
Измерения

Актуаторы
Исполнительные
устройства

Датчики
Сенсоры

Решающее
устройство
ЭВМ
Контролер

МикроСистемная
Техника



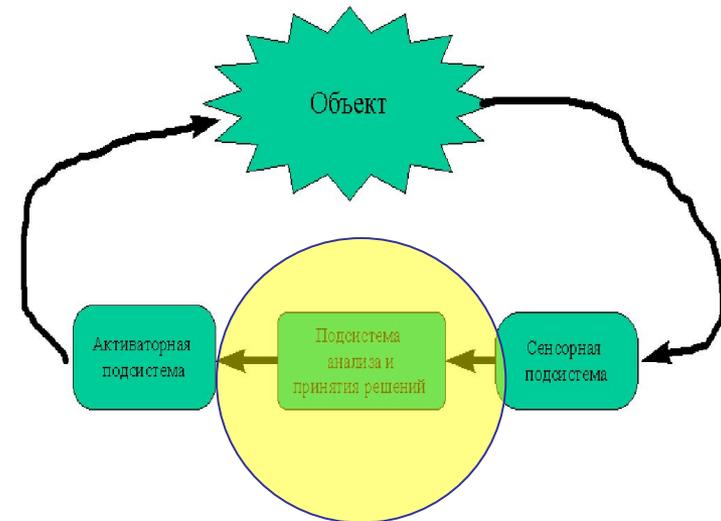
Микротехнологии



Параллельное (“групповое”) изготовление большего количества одинаковых устройств

Усложнение геометрической конфигурации не является ограничением и не ведет к удорожанию устройства

Микроэлектроника



Однотипное и одновременное создание сложных комплексных структур

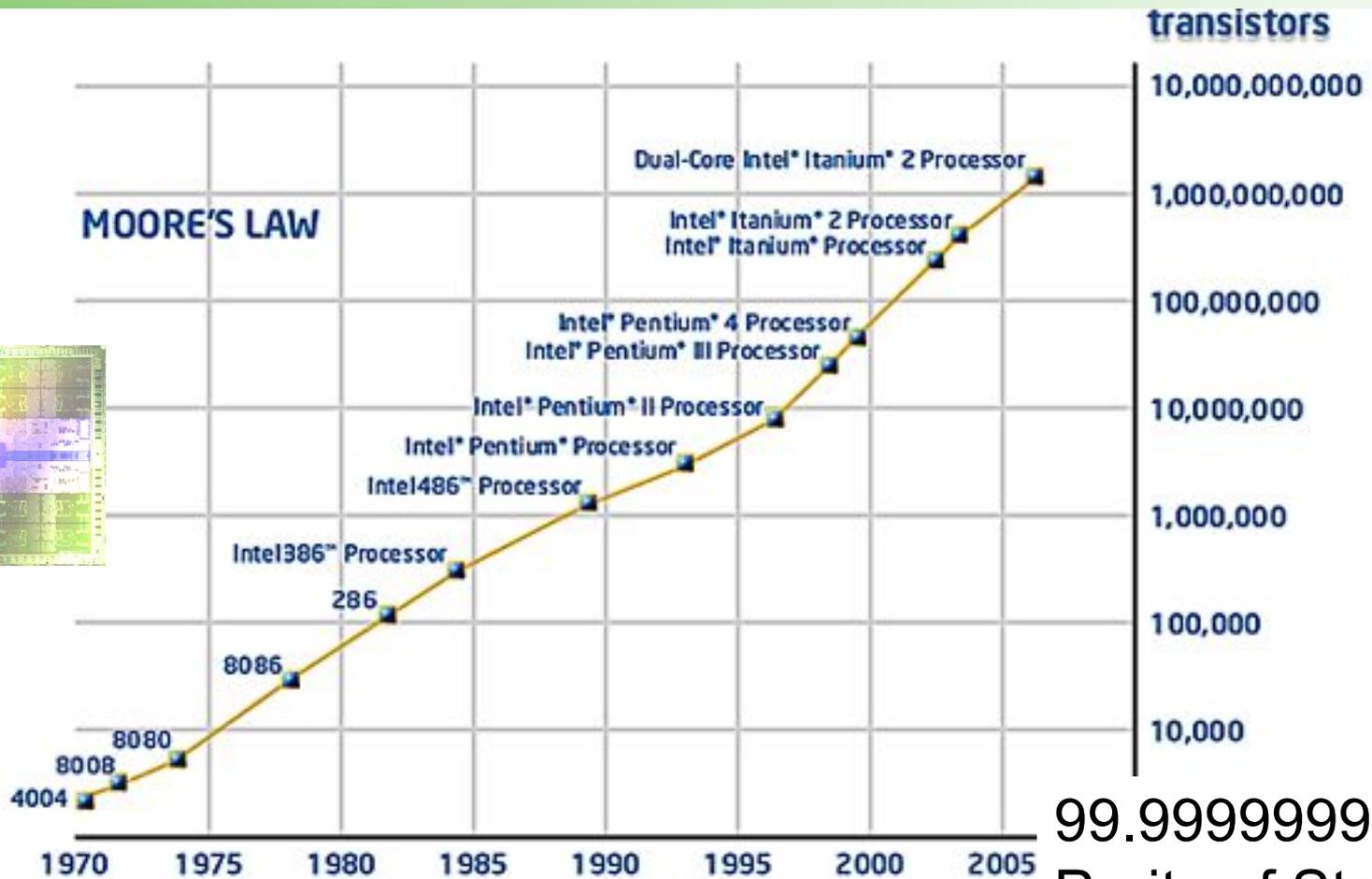
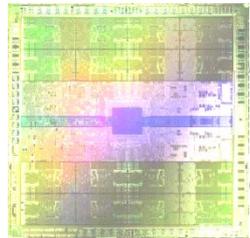
$$S = \frac{10^6}{N}$$

Снижение сроков разработки и стоимости производства

Низкая стоимость единичного изделия

Закон Мура

3 000 000 000 транзисторов в 2010 г.

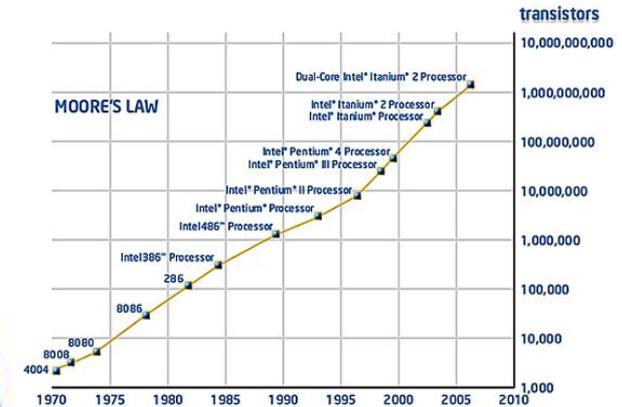
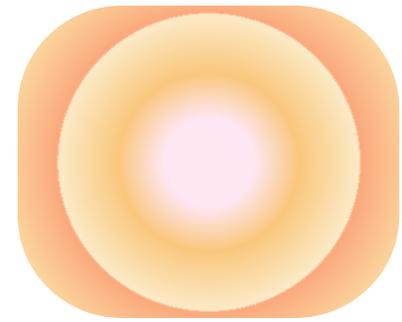


99.999999999 %
Purity of Starting
IC Si Wafer

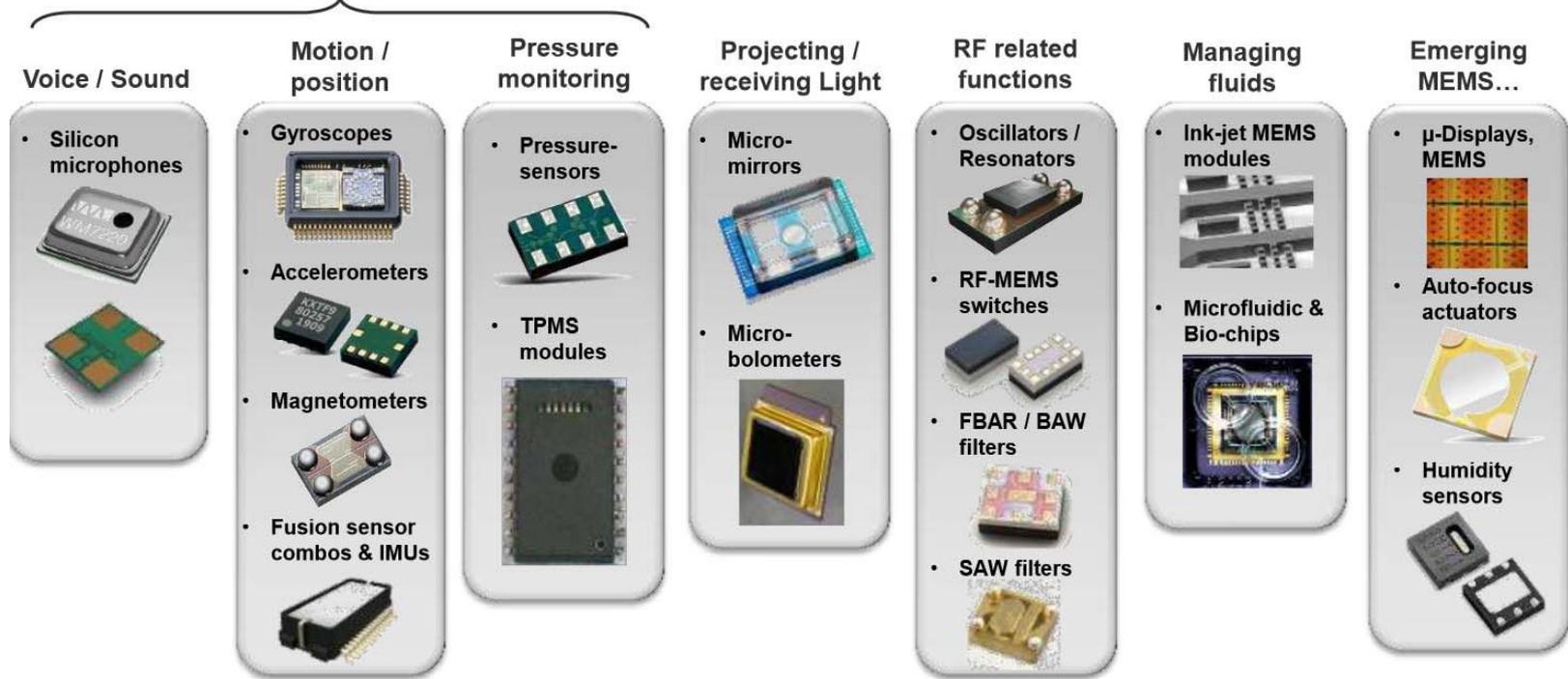
Sense Compute Store Transmit

Микроэлектроника

Микротехнологии



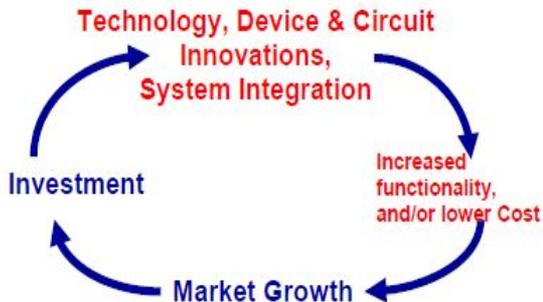
Sensing applications



- The application scope of MEMS is broad but rather fragmented and diversified!

Inertial sensors value chain in 2011

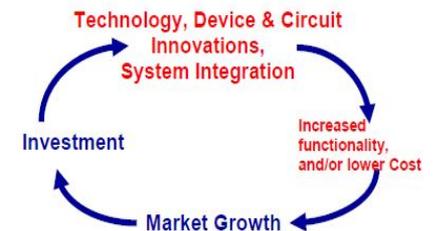
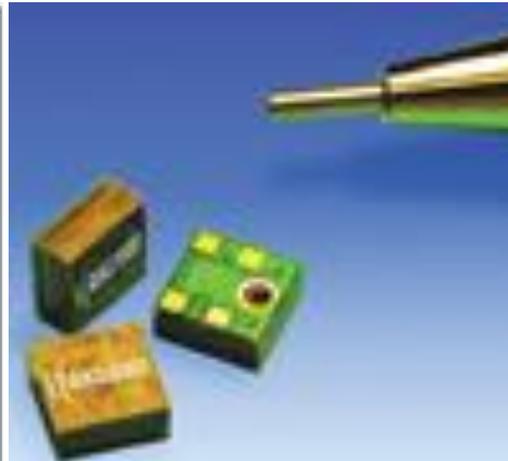
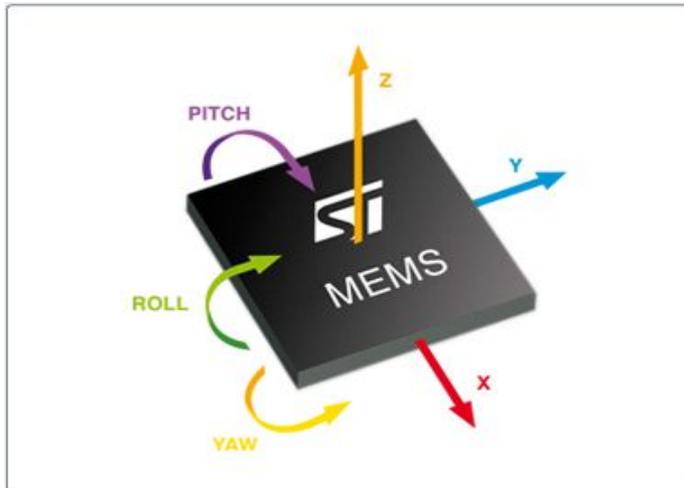
~ \$2.6B industry! (consumer + auto)



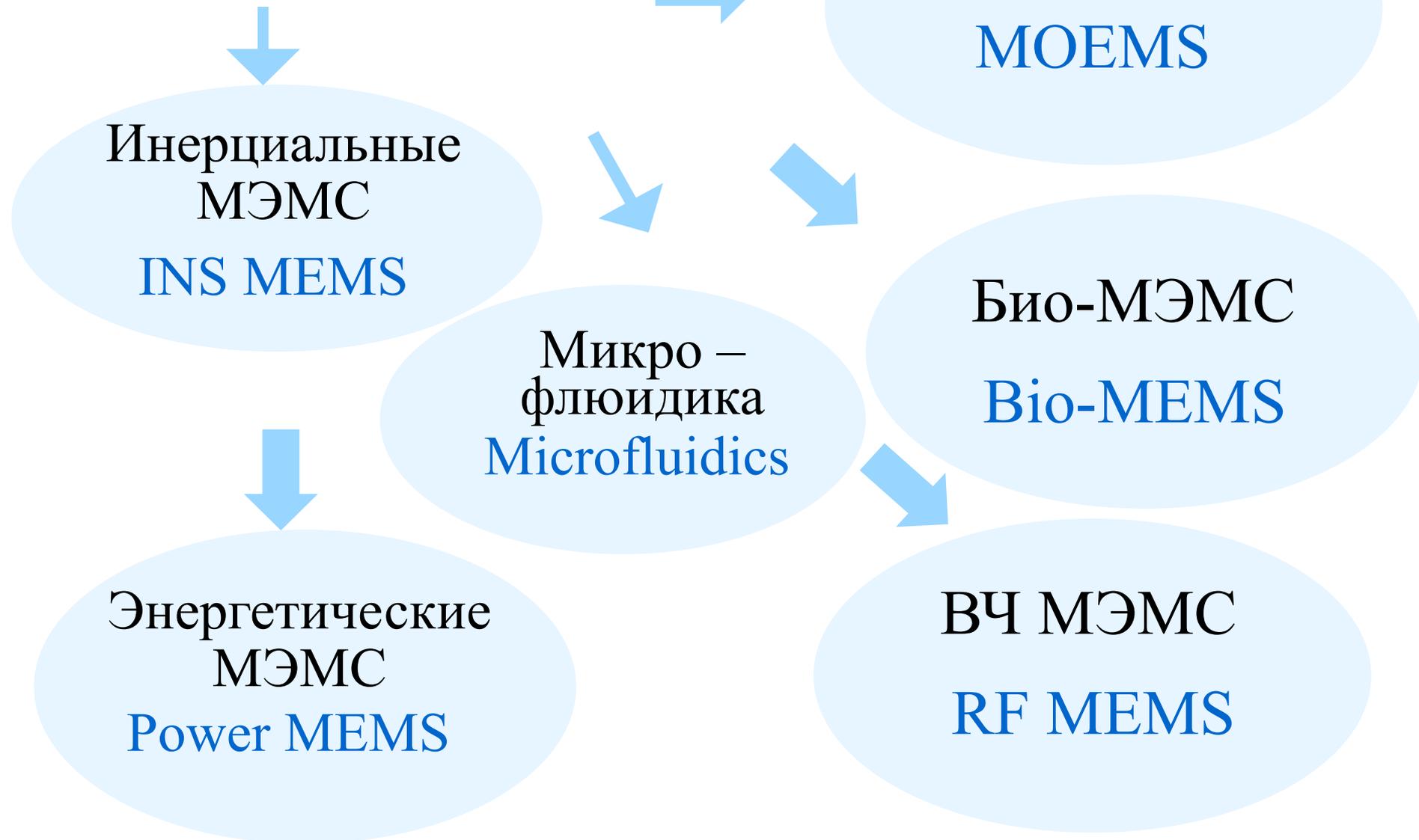
+ \$1.1B gross margin (Cost of sales, G&A, R&D, Operational margin)

Микросистемная техника

Мобильная связь



МСТ - МЭМС



Терминология

ЕВРОПА

Микросистемная техника

МСТ

MST

США

Микроэлектромеханические

системы

МЭМС

MEMS

Япония

Микромашины

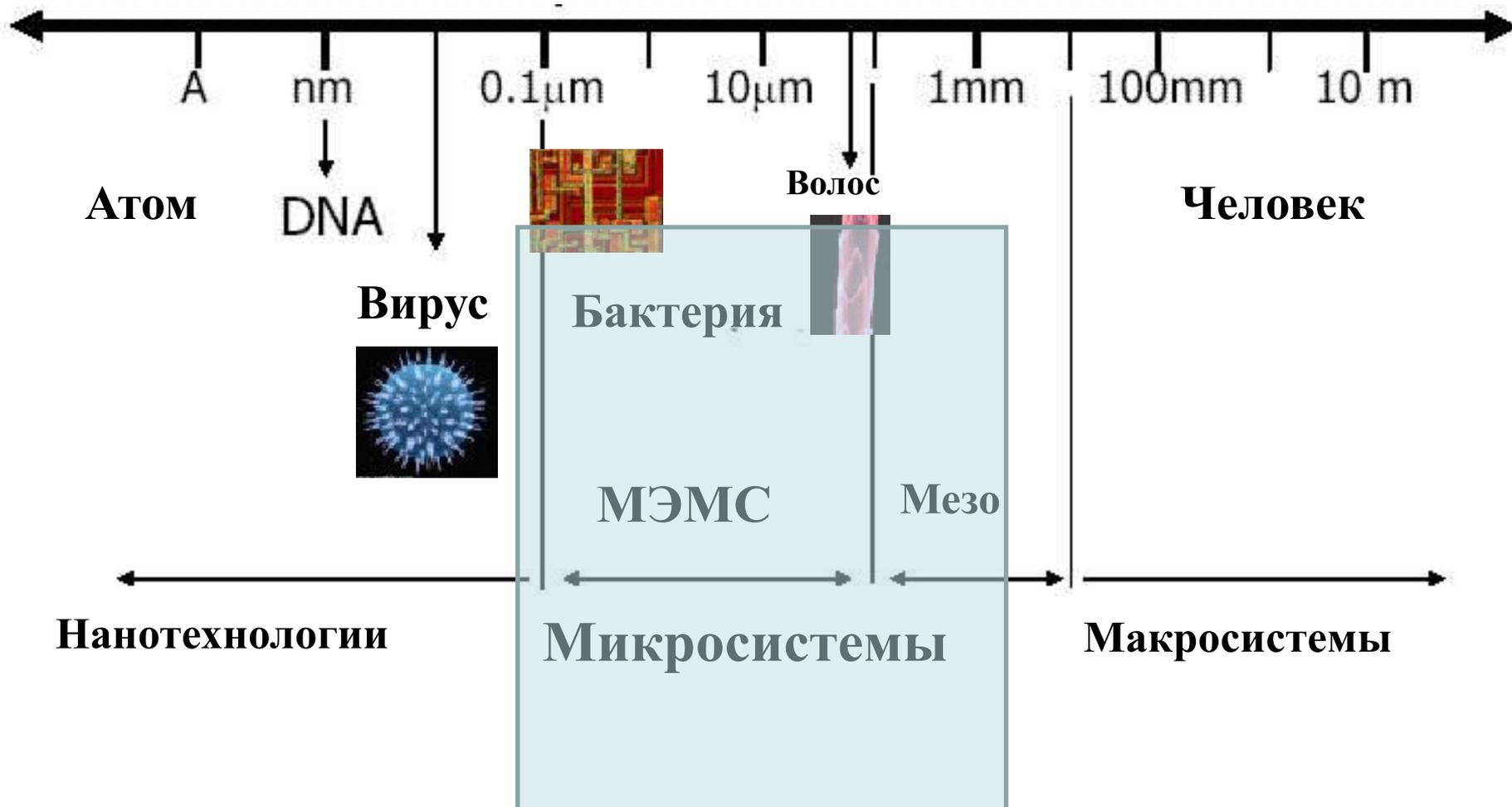
Micromachines

Микротехнологии

Нанотехнологии

Микросистемная техника

Масштабы и шкалы



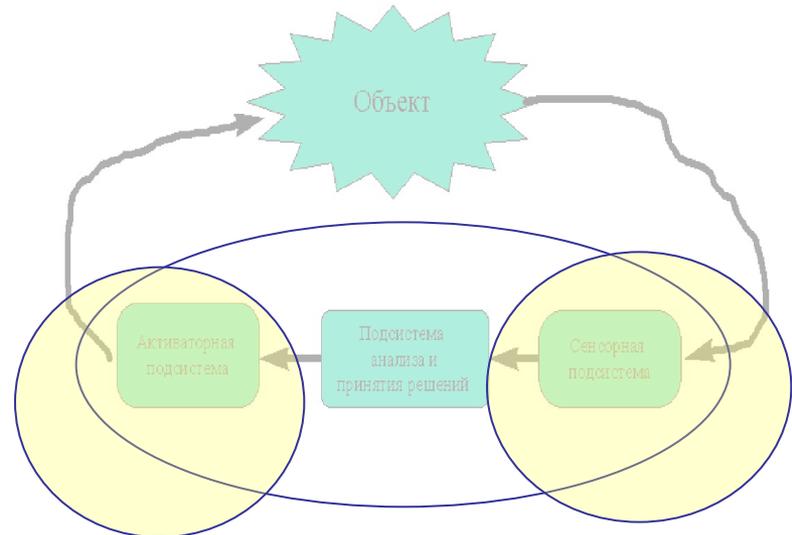
Микротехнологии



**Параллельное (“групповое”)
изготовление большого
количества одинаковых устройств**

**Возможность одновременного
формирования механических,
электрических, химических и др-др.
элементов датчиков**

Микросистемная техника



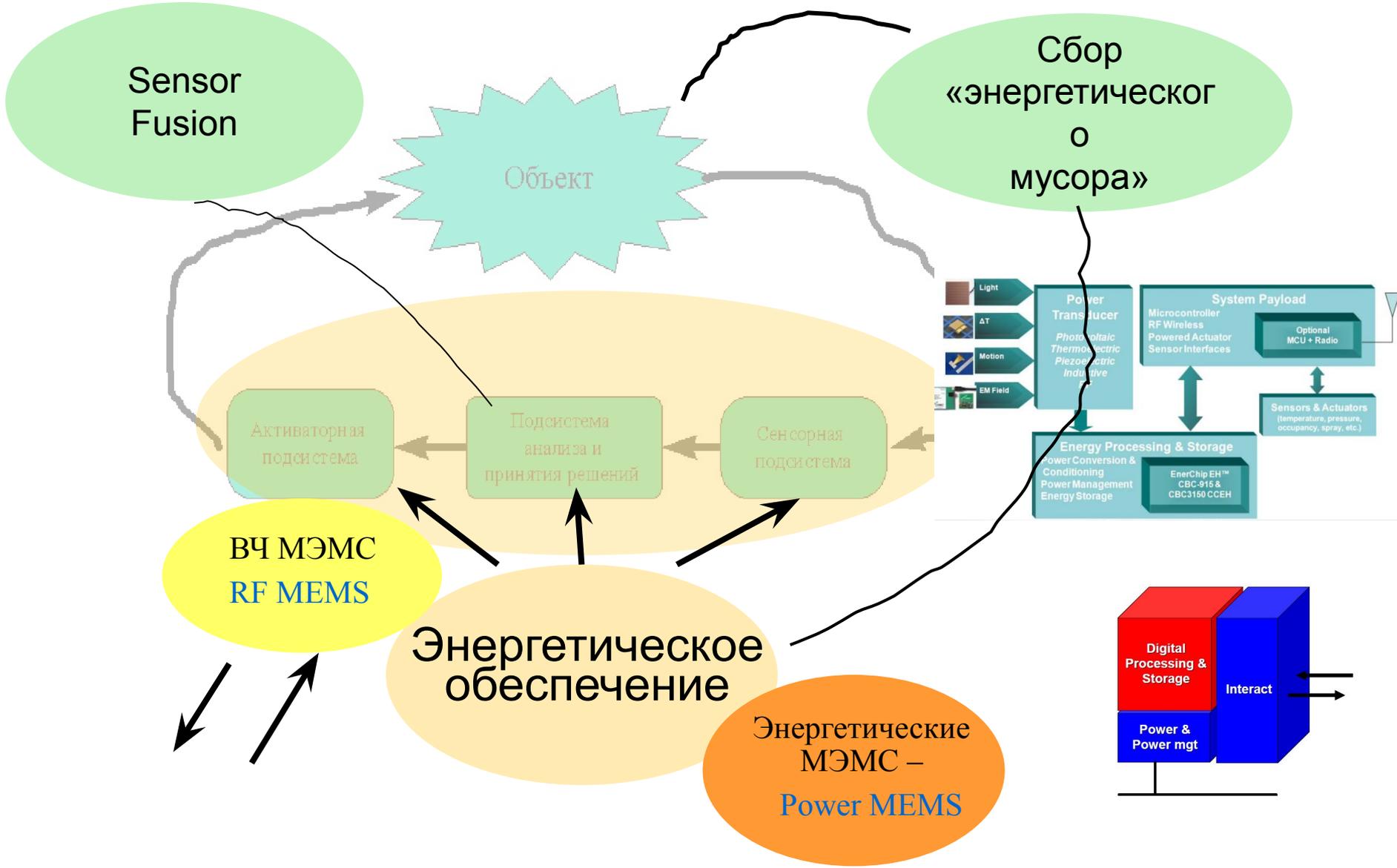
**Однотипное и одновременное создание
сложных комплексных структур**

**Усложнение геометрической
конфигурации не является ограничением
и не ведет к удорожанию устройства**

**Низкая стоимость
единичного изделия**

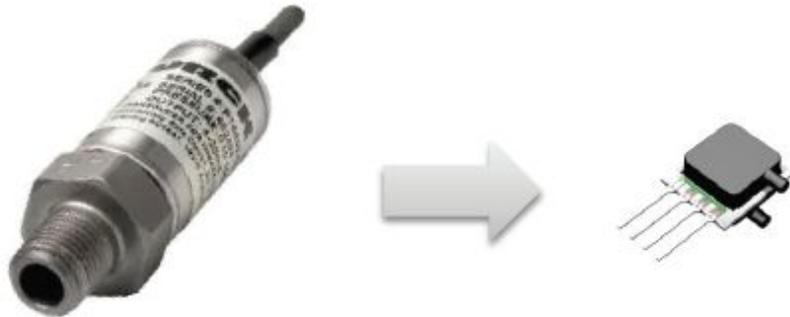
Микросистемная техника

Energy Harvesting



Масштабы и шкалы

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ



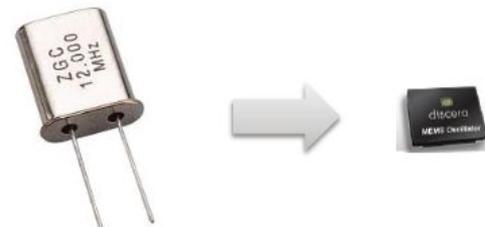
ГИРОСКОПЫ



МИКРОФОНЫ



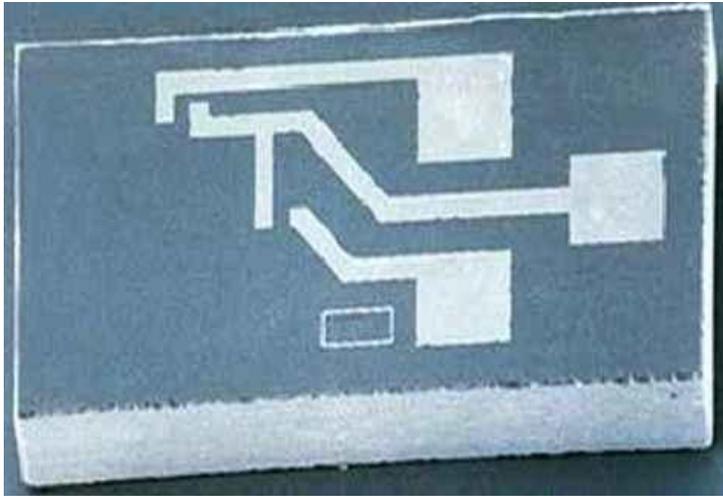
РЕЗОНАТОРЫ



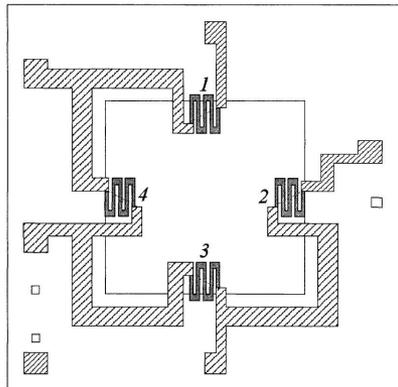
How Can We Roadmap MEMS?

От истоков

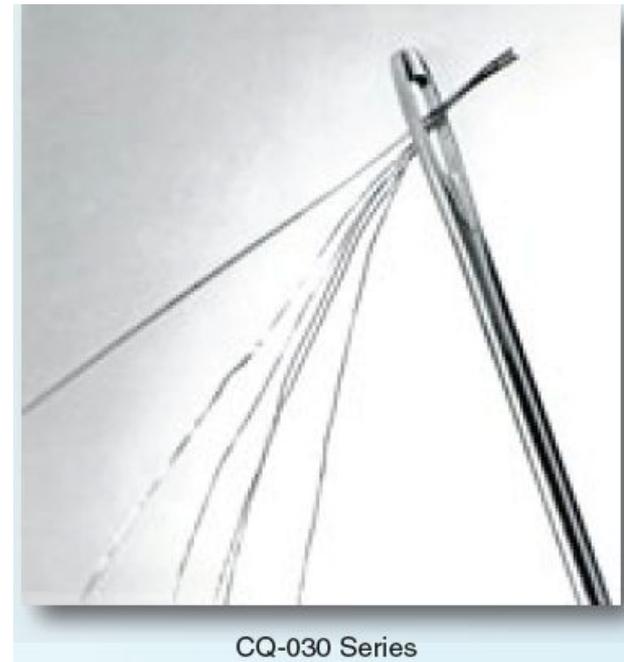
ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА



- Pressure Sensor - 1965



Фиг. 1

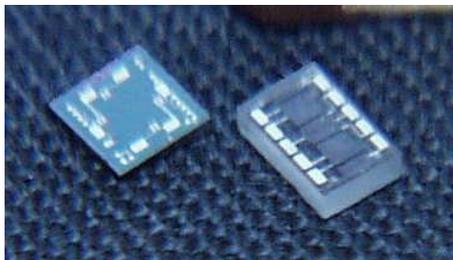


0.15 x 0.4 x 0.9 mm

Датчики давления



ЛПИ



Кремниевые
чипы

ЦАГИ



1978

Низкопрофильные датчики для
установки на поверхности
аэродинамических моделей

Кремниевый чип
толщина 0,4 мм
Площадь 7*2,8 мм

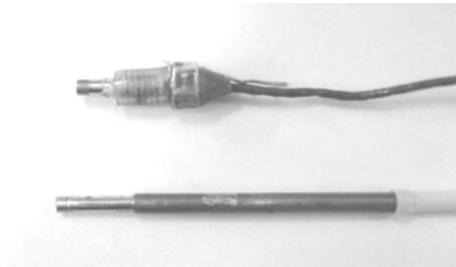
Мембрана
толщина 5..50мкм
Площадь 1,2*0,8
мкм



Диазоны давлений 0...10 кПа, 0...1
МПа, Частотный диапазон 0...20 кГц;

Тип Альфа

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ для аэродинамических исследований

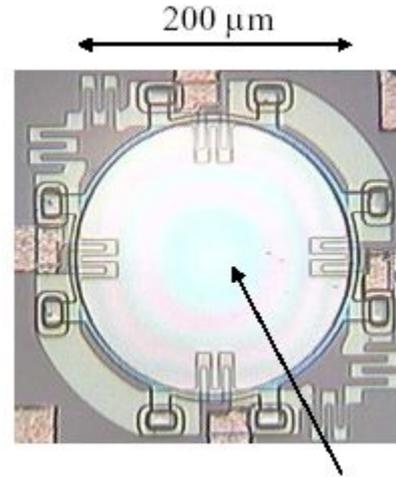


ENDEVCO

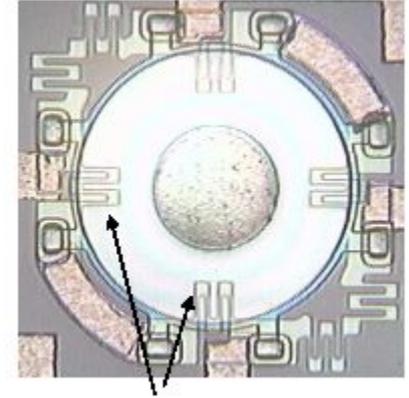


KULITE

CQ-030 Series

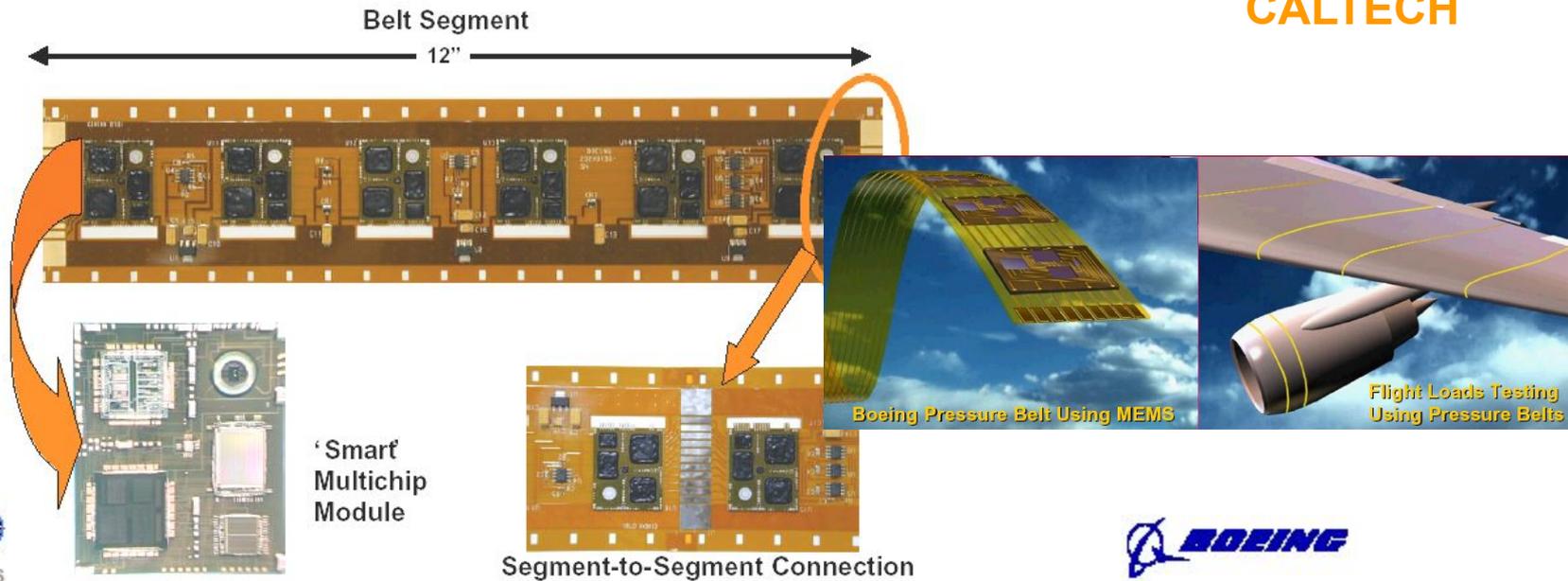


Nitride diaphragm



Poly strain gauges

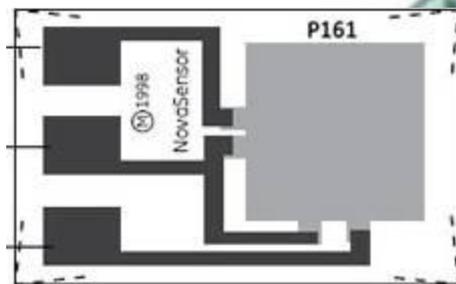
CALTECH



ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

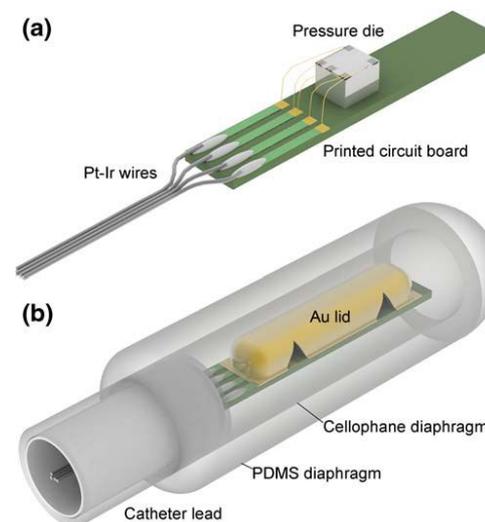
Катетерный датчик

1150 x 725 мкм



1500 шт/пл

Пластина и
кремниевые чипы



3F Gauge Pressure Sensor Die

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Автомобиль



Микросистемная техника

Автомобиль

Плотность заряда
(аккумулятор)

Линейное ускорение
(подушка безопасности)

Алкоголь
(водитель)

Температура
(комфорт)

Давление
(MAP, топливо, EGR)

Акустика
(столкновения)

Кислород
(воздух/топливо)

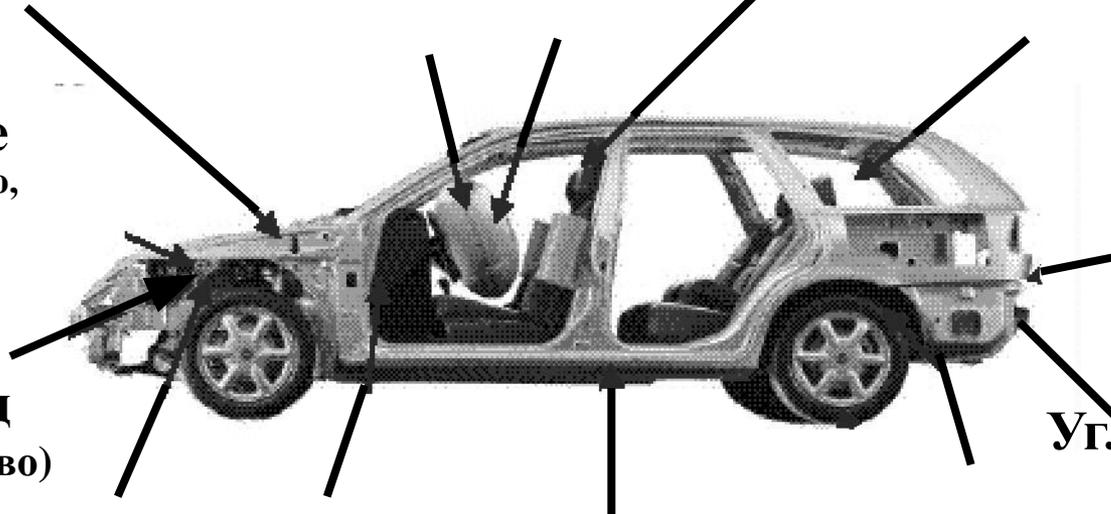
Угловое ускорение
(подвеска)

Расход воздуха
(воздух / топливо)

Гироскопы
(навигация)

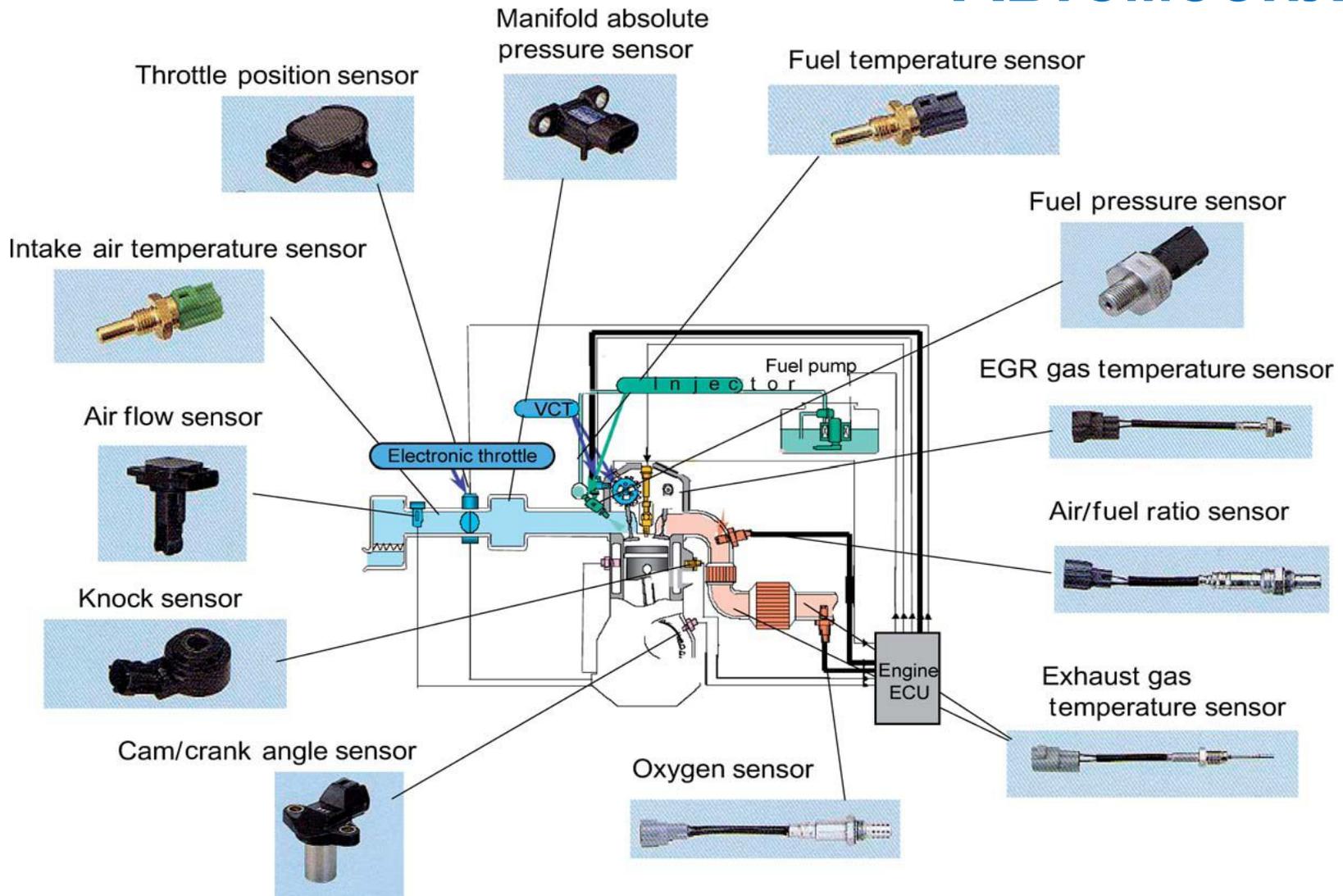
NOX
(выхлоп)

Давление
(шины, ABS)



Микросистемная техника

Автомобиль



Микросистемная техника

Военная техника



Узел инерциального датчика



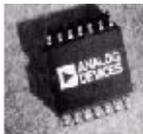
Детонатор



Воспламенитель



Датчик давления



Датчик удара



МЭМС взрыватель
110 см³



Взрыватель МК 48
1850 см³

Микротехнологии
обеспечивают
уменьшение объема

в 17 раз

при уменьшении
себестоимости в 4 раза

МЭМС предохранительно-
- исполнительное устройство для торпед



Microsystems Technology Office



МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Акселерометры

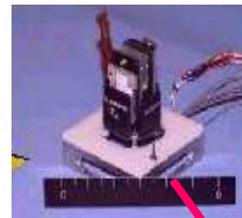
Гироскопы

ИНС - GPS

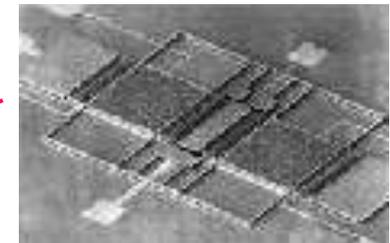


2000

Годовой выпуск
более 500 млн



Объем 1
6 см³

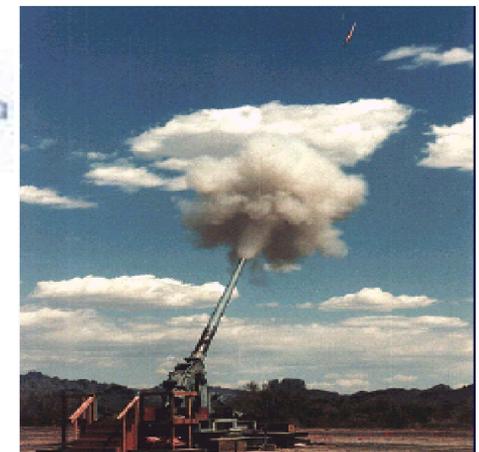


2000

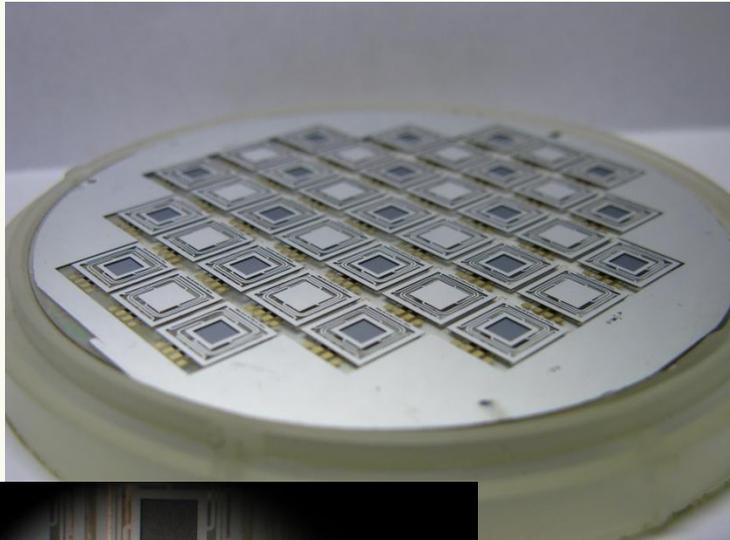
Годовой выпуск
более 5,00 млн



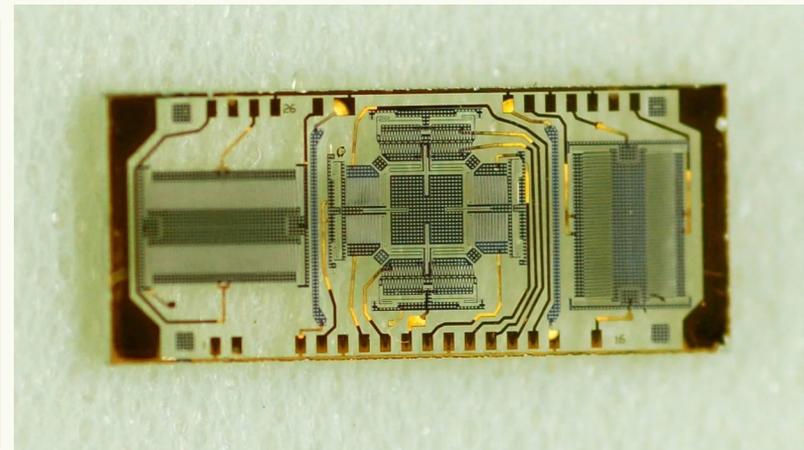
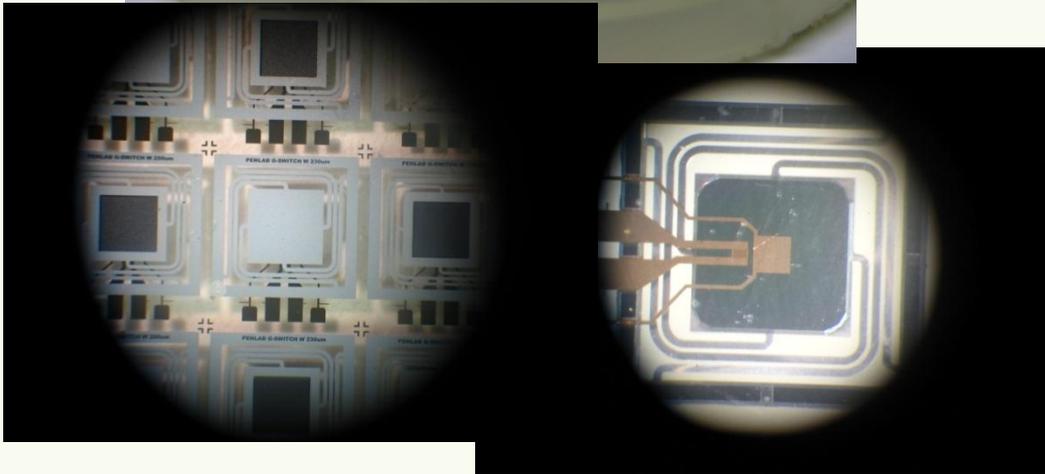
Снижение СКО в 10 раз



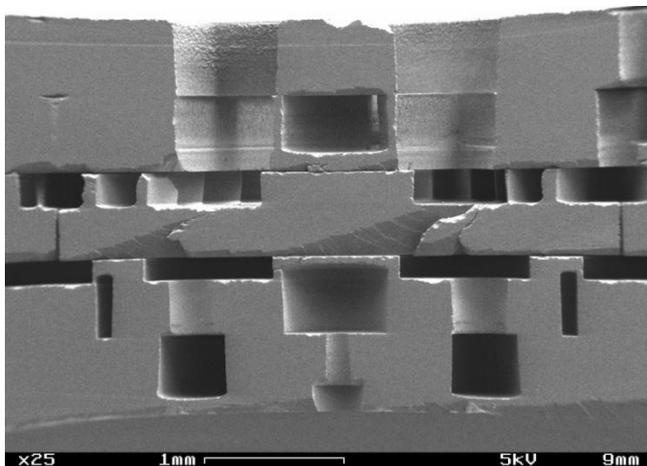
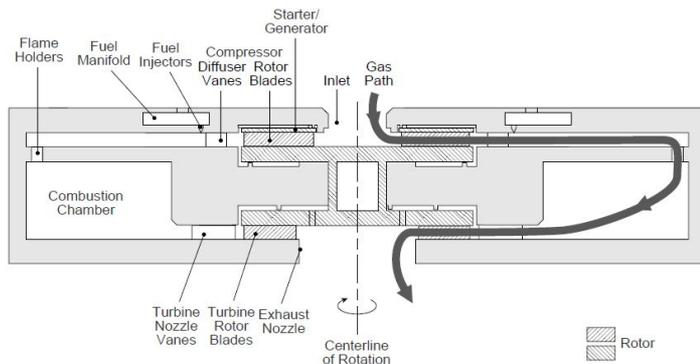
MEMS в военной технике



- Системы позиционирования
- Системы координации
- Сенсорика
- Связь
- Управление подрывом



MIT Microengine Project

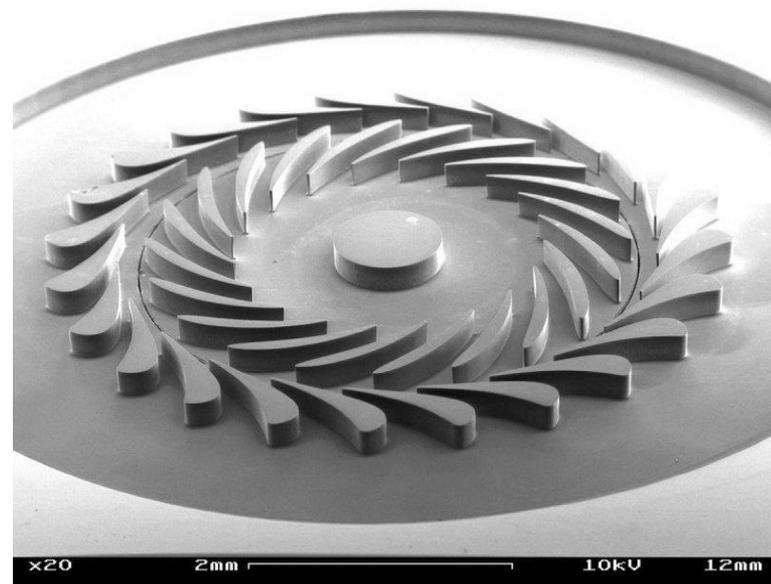


Расчетные параметры

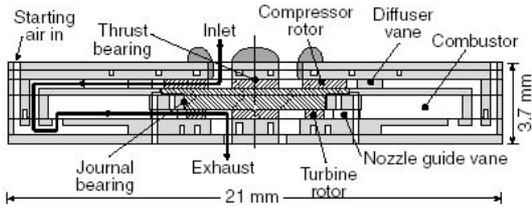
2.2 млн об/мин 60 Вт

энергетические
МЭМС –
Power MEMS

Микроурбина
D4мм



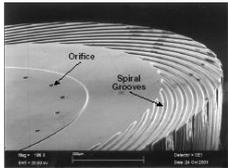
Micro-Turbo-Generator



Демонстрация: 1,2 млн об/мин 17 Вт



Компрессор D8мм
U2 - 500 м\с

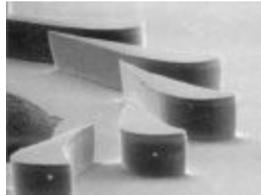


Воздушные подшипники

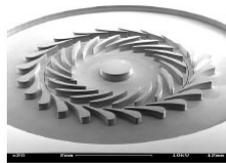
D700мкм

Гидродинамические:
спиральные канавки h1,5мкм

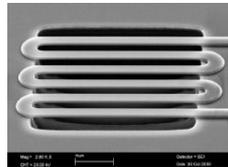
Гидростатические:
отверстия n12 d12мкм



Лопатки h250мкм



Турбина D4мм

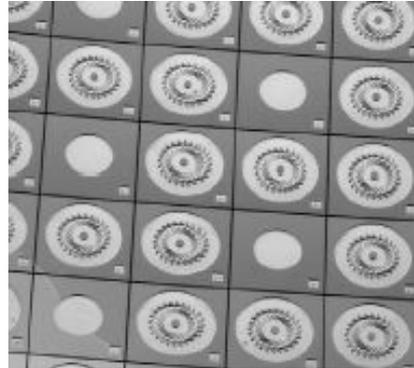


Датчик оборотов и температуры
PolySi 50*50 мкм h, менее 1мкм

МЭМС - источники

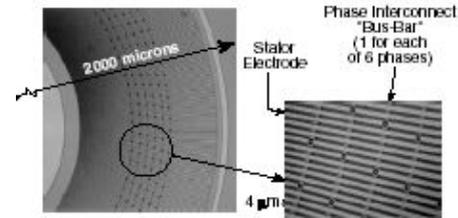
Энергии

Групповое изготовление
элементов



Топливный клапан

2*2мм, D1мм h3мкм
5000 шт с 1 пластины



Электроиндукционный мотор – генератор
статор D4 мм , 131-полюс, 6-фаз

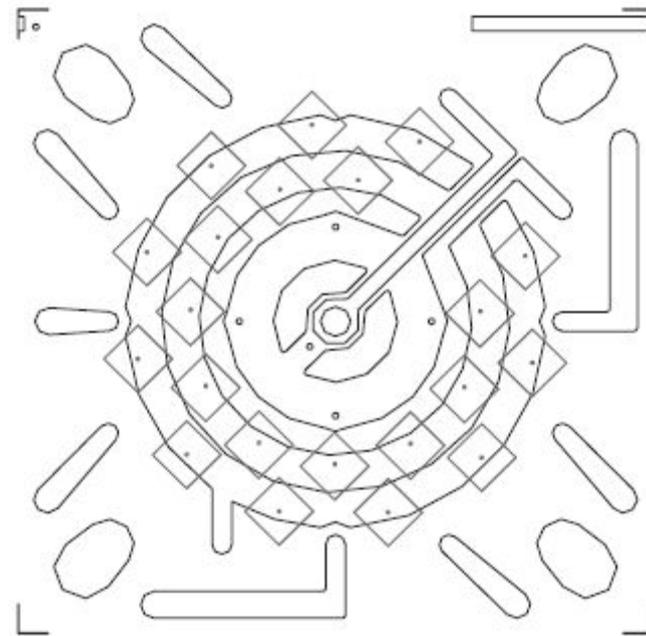
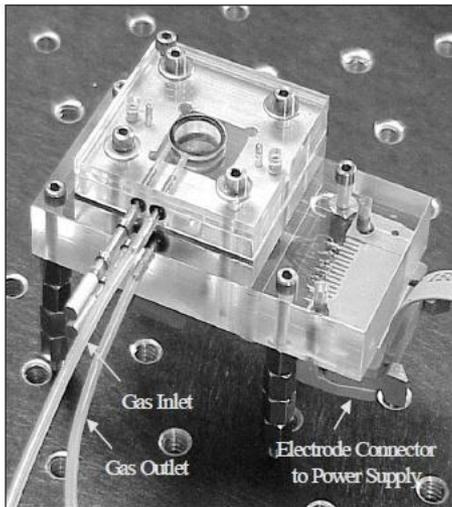
Расчетные параметры

2.2 млн об/мин 60 Вт

MIT Microengine Project

Топливный клапан

2*2мм, D1мм h3мкм
5000 шт с 1 пластины

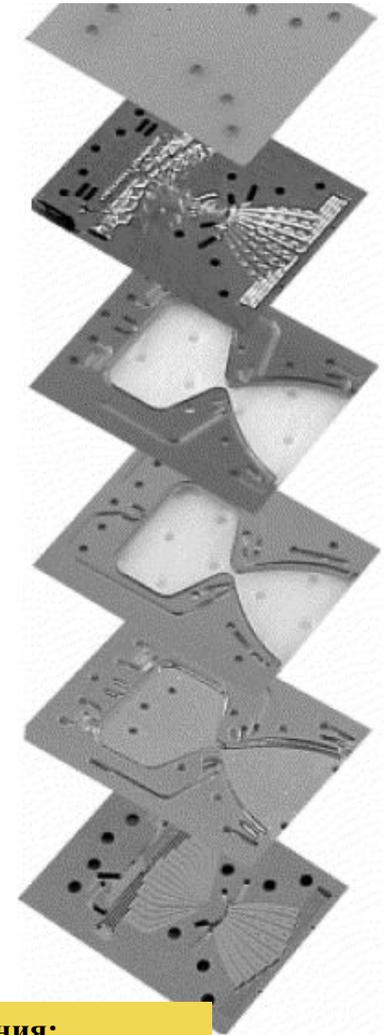
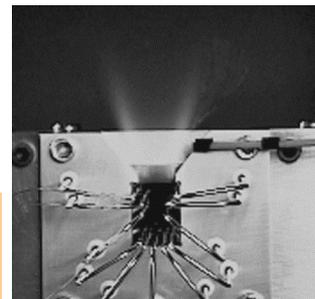
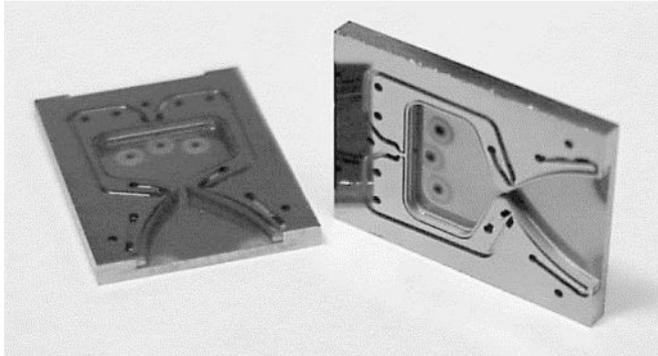


МЭМС - двигатели

МикроЖРД

MIT Microengine Project

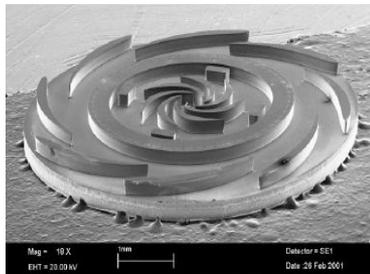
Масса 1,2 г, габариты 18*13,5*3 мм



Расчетные параметры

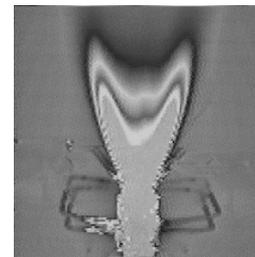
Тяга 15Н, давление в камере 125 атм
тяга/вес 1000:1

тяговая мощность 20 кВт, удельный импульс
300 с



Турбонасос

Производительность 2,5 г/с



Огневые испытания:

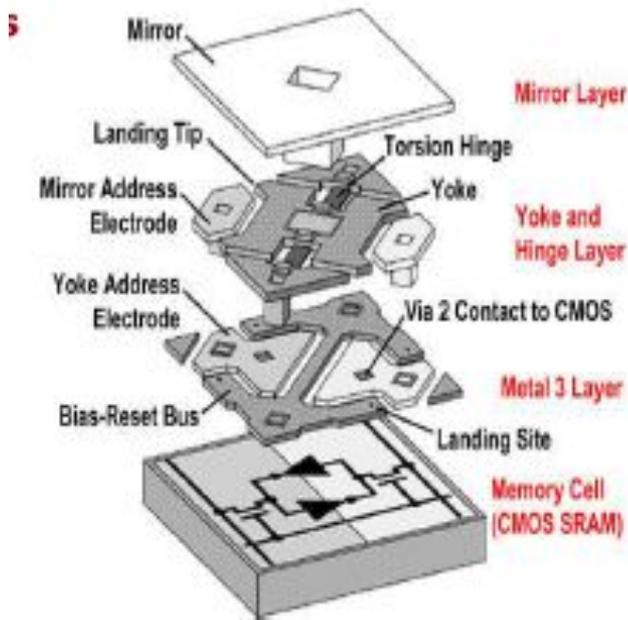
тяга 1Н, давление в камере до 12 атм,
тяга/вес 85:1

тяговая мощность 750 Вт

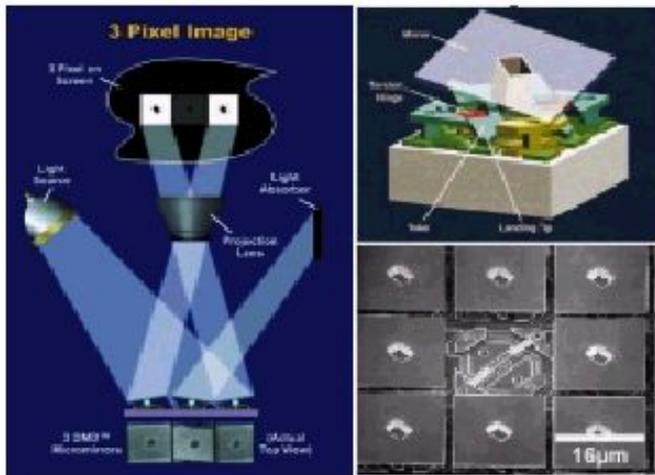
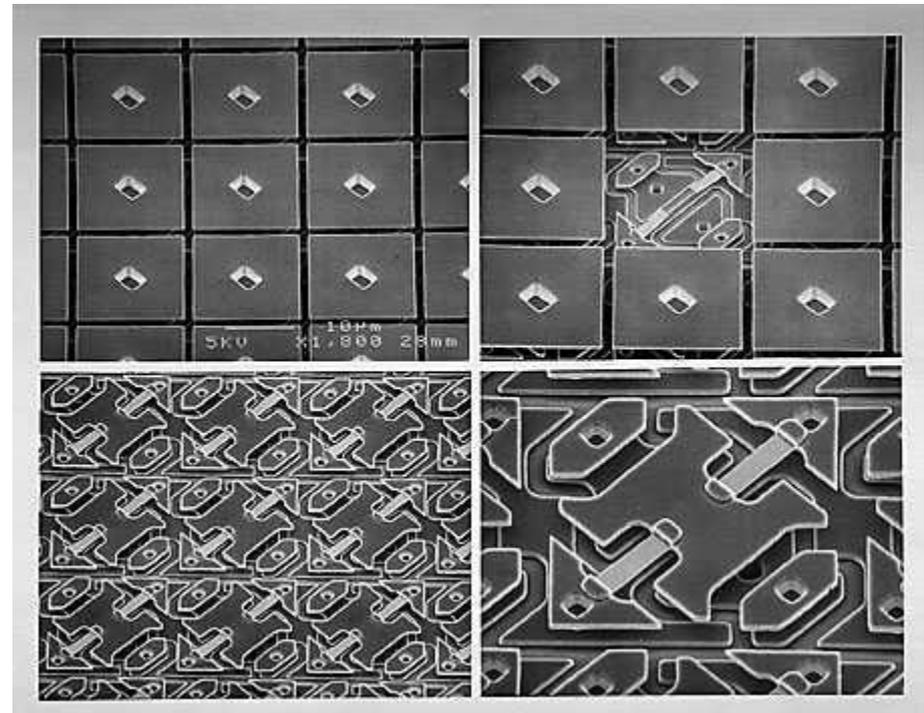
Кислород – метан

МОЭМС MOEMS

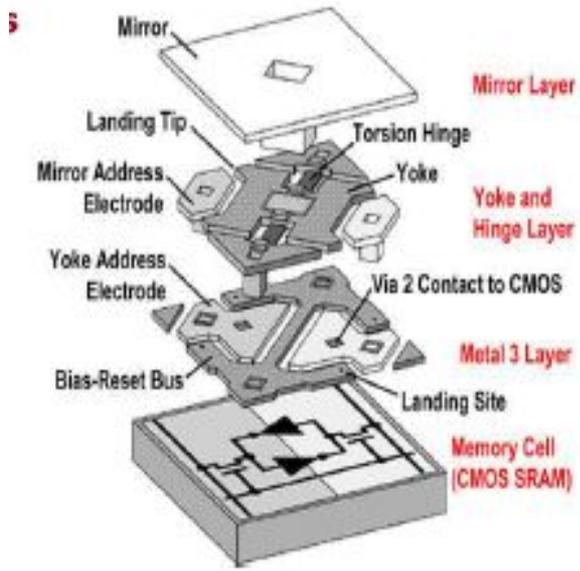
1024x1024 микрозеркал



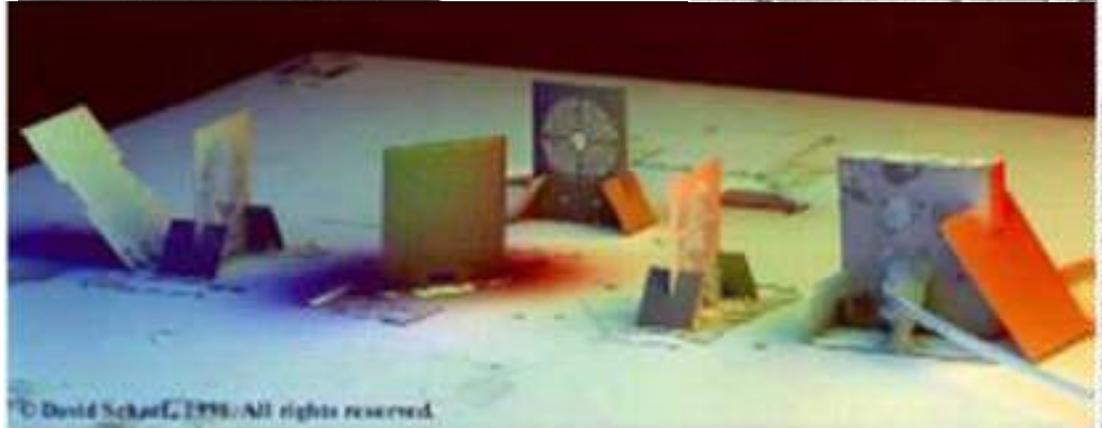
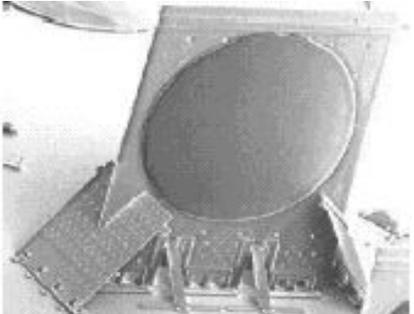
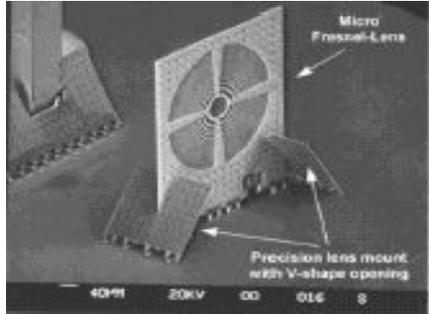
Цифровое микрозеркальное устройство фирмы TI



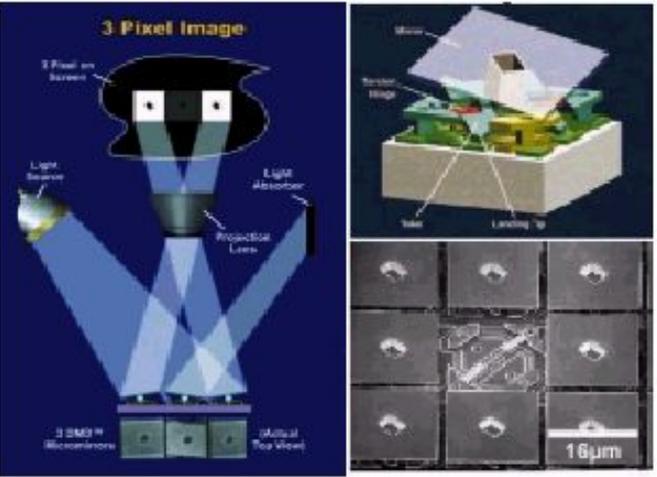
МОЭМС МОЕМС



Цифровое микрозеркальное устройство фирмы TI

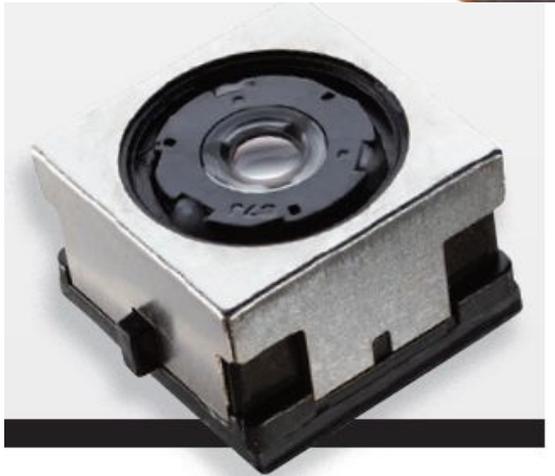
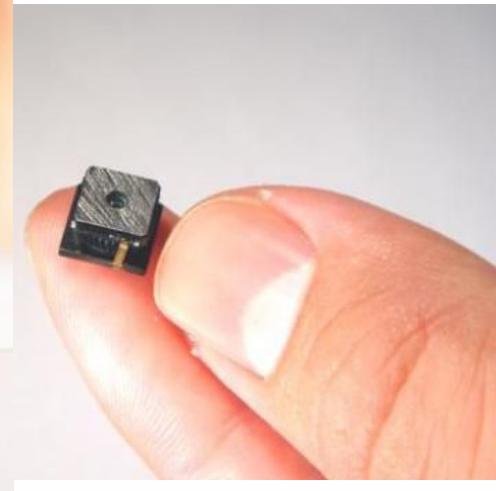


Микро Оптическая скамья Wu 1996



Fully integrated mems|cam module

MOEMC
MOEMS

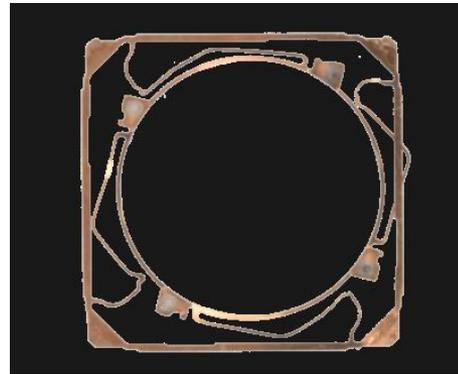
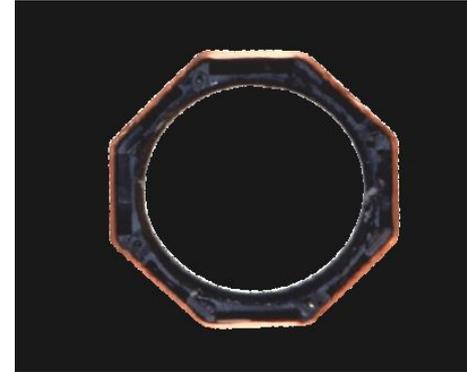
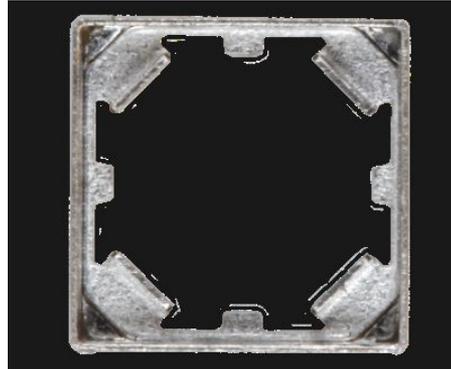
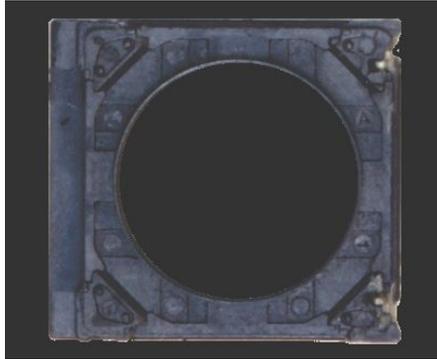


250M phones shipped with DOC technology

Voice coil autofocus

Versus

Mems cam autofocus

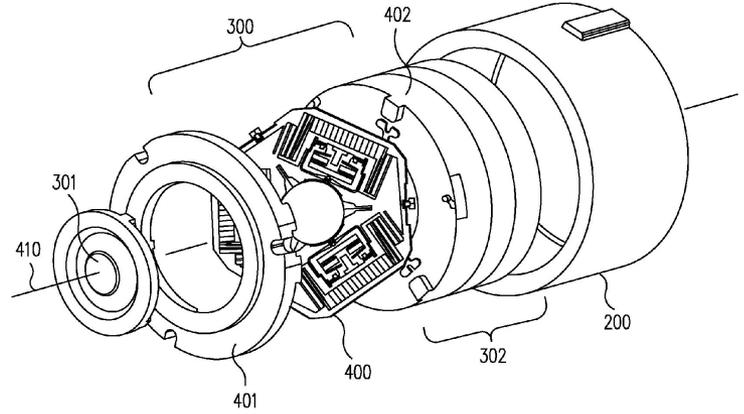
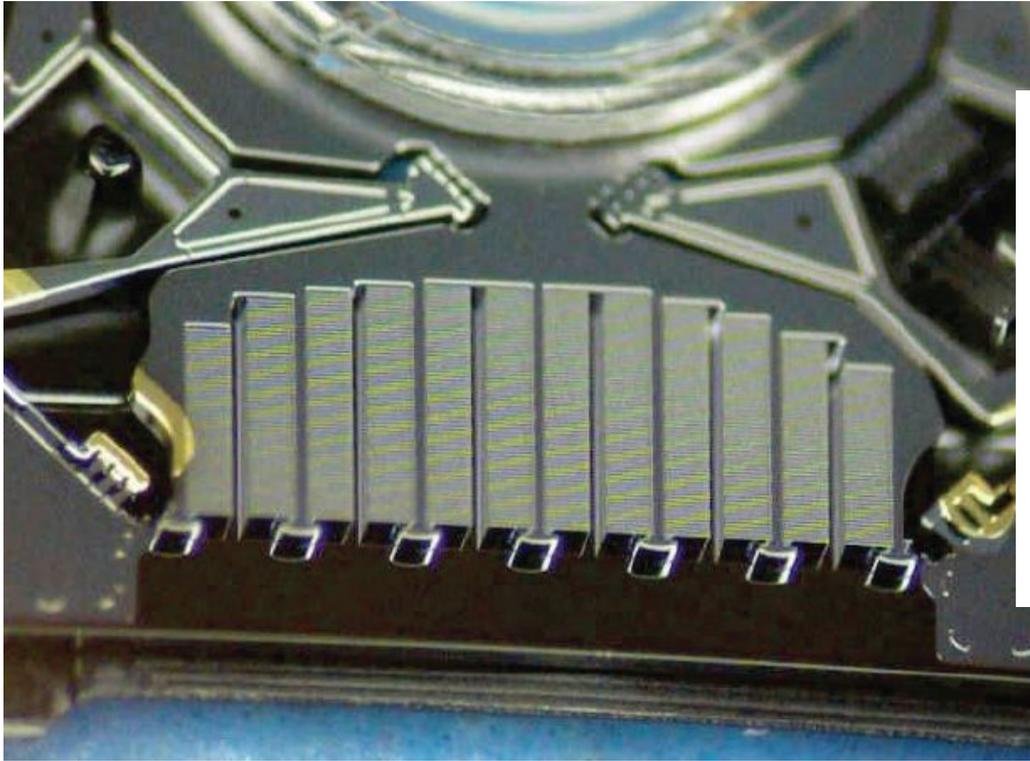
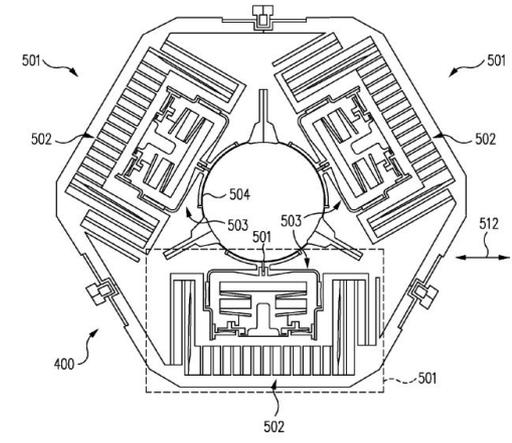


250M phones shipped with DOC technology



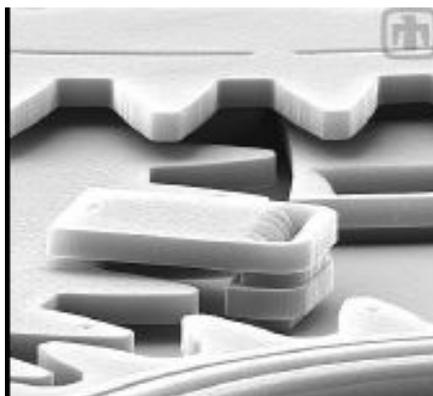
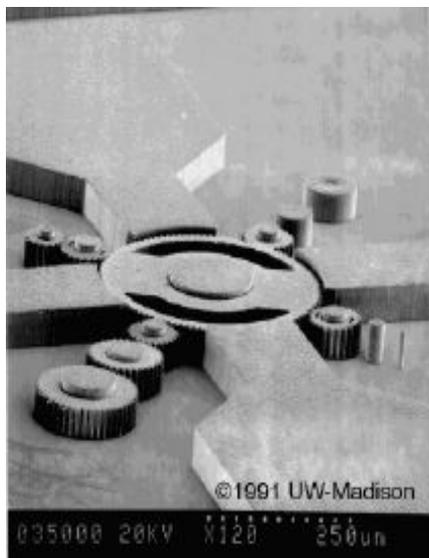
MULTIPLE DEGREE OF FREEDOM ACTUATOR

US 2013/0077168 A1

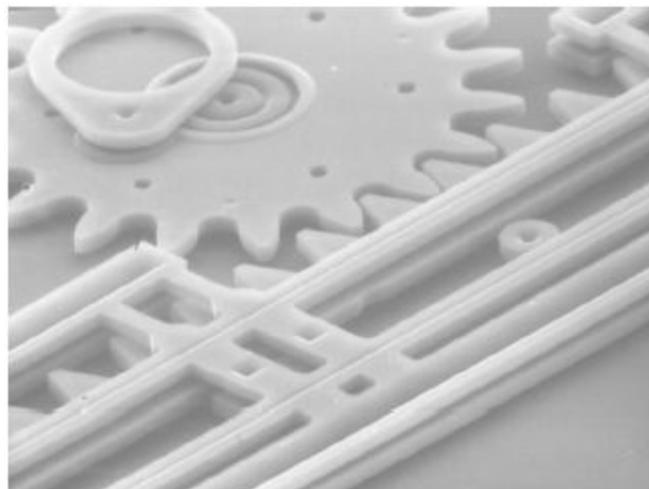
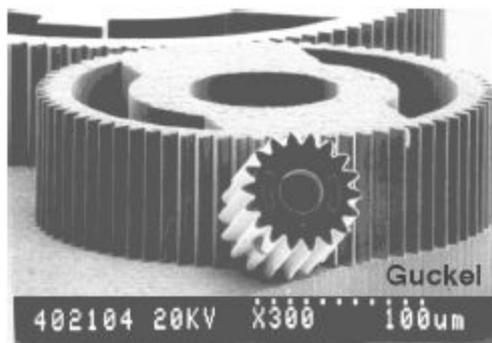


МЭМС

МИКРОМЕХАНИКА



Элементы зубчатых
зацеплений



Sandia National Labs

Микроредукторы

ВЧ МЭМС RF MEMS

СВЧ переключатели



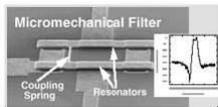
СВЧ конденсаторы



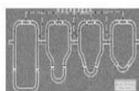
СВЧ индуктивности



СВЧ сетевые фильтры

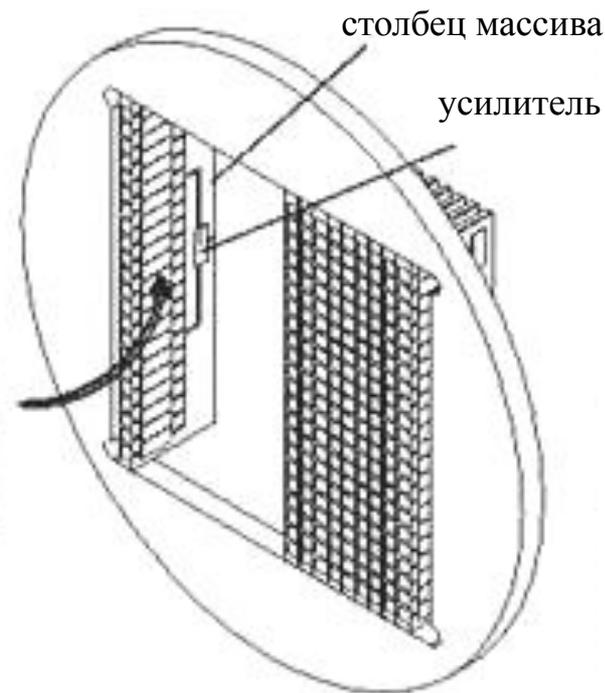


СВЧ волноводы



СВЧ перестраиваемые схемы

СВЧ МЭМС в ФАР



**Возможности создания
ФАР новой архитектуры и
компоновки.**



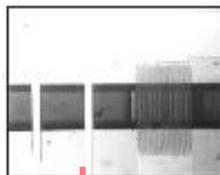
Microsystems Technology Office

CU MEMSweb

Микро – флюидика Microfluidics

Био-МЭМС Bio-MEMS

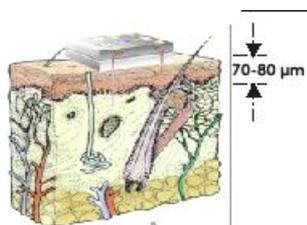
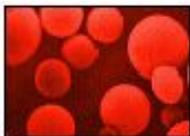
Биофильтр с
иммуносенсором



Микроклапан

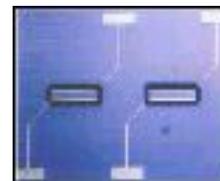
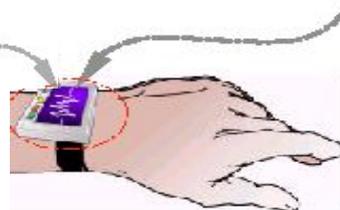


Магнитный гомогенизатор
с дендримером



Система управления

Встроенный
Био - чип



Датчик расхода жидкости

Интегральная микрофлюидная система для
биохимического анализа

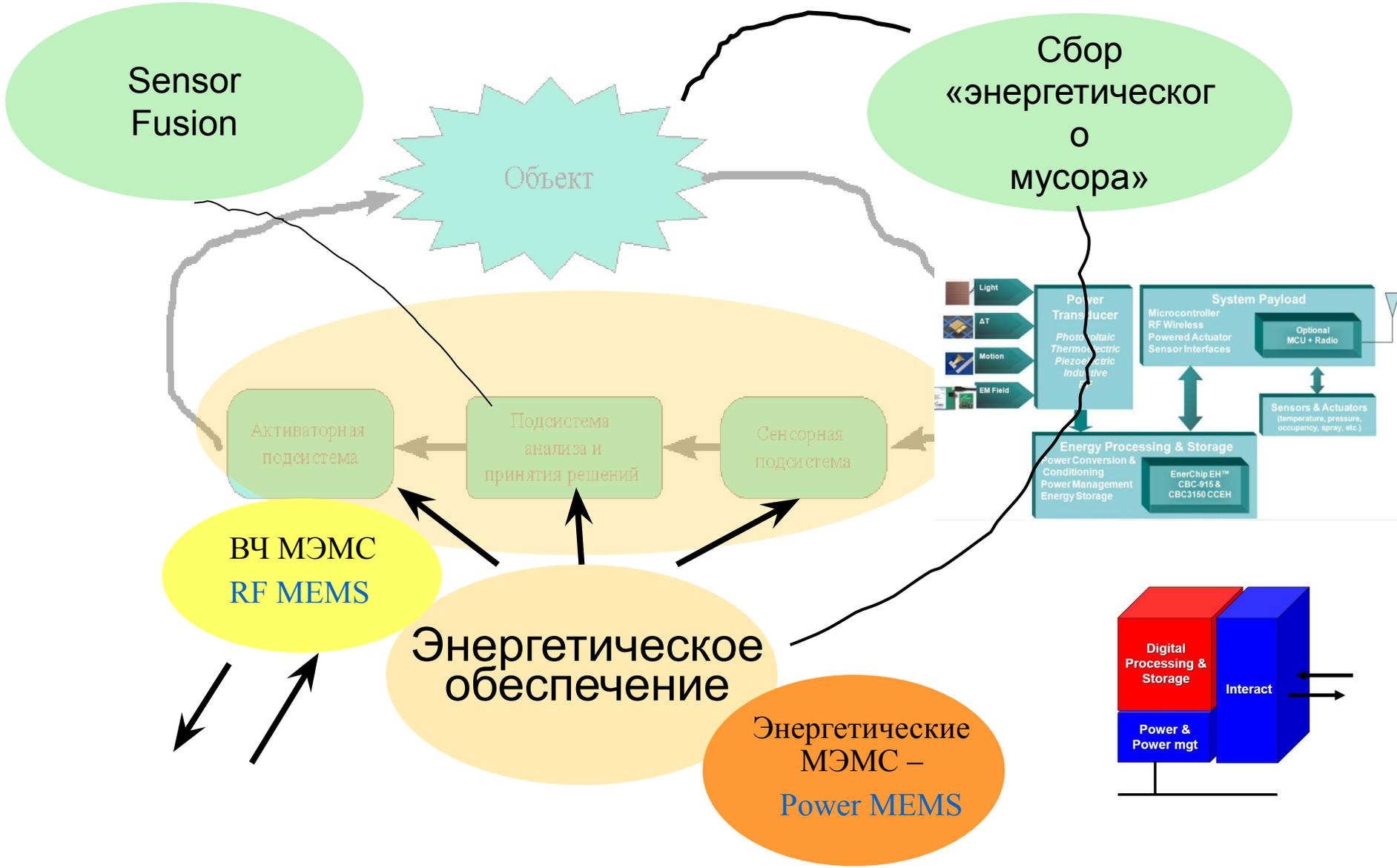


Microsystems Technology Office



Микросистемная техника

Energy Harvesting



FOR TRILLION SENSOR ROADMAP

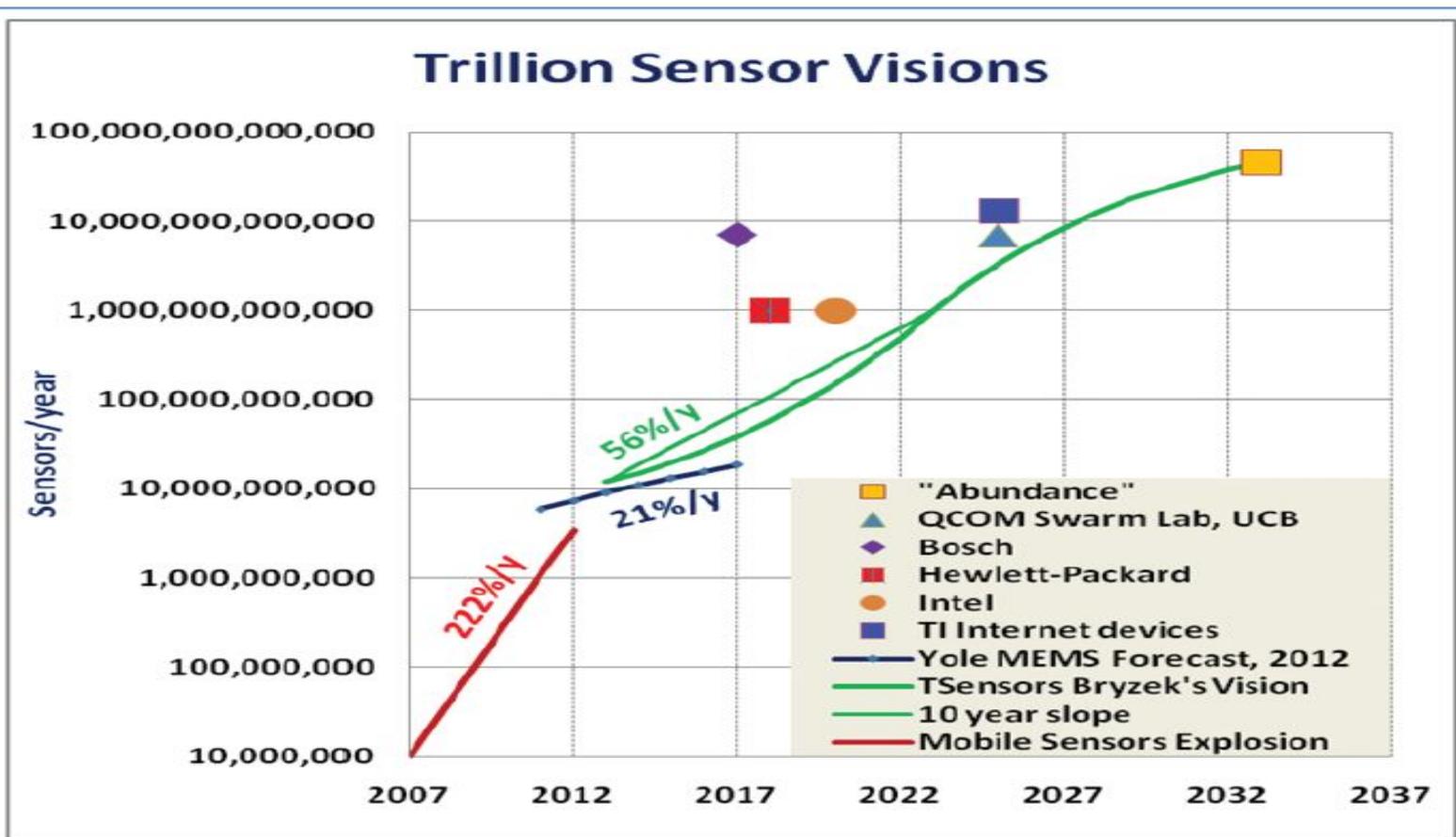


Figure 1. Mobile sensor market for volumes not envisioned by leading market research organizations in 2007, grew exponentially over 200%/y between 2007 and 2012.

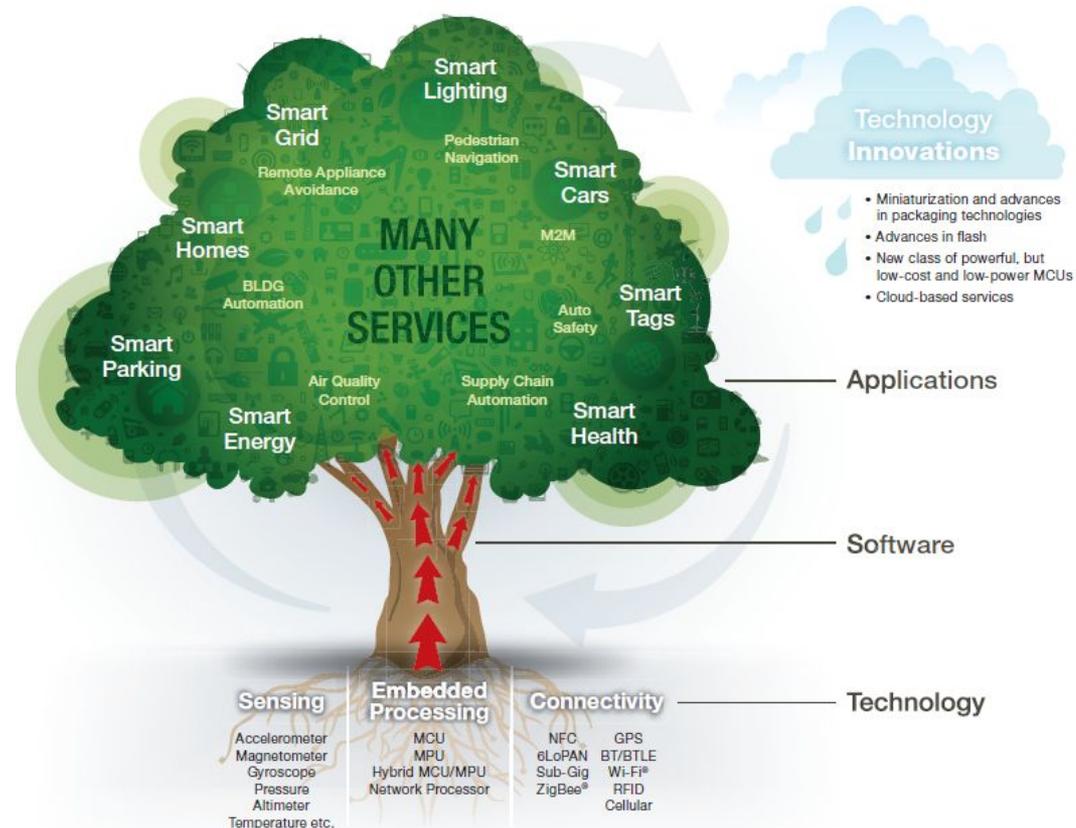
Several organizations presented their visions for a continued growth to trillion(s). Market research companies don't yet see this growth (see Yole's forecast). So the explosion to trillion(s) is likely to be driven by applications not yet envisioned by leading market research organization.

As sensor development has been historically much longer than pure semiconductor technologies, TSensors Roadmap development is being launched to improve visibility of needed sensors to enable their accelerated development.

РАЗВИТИЕ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

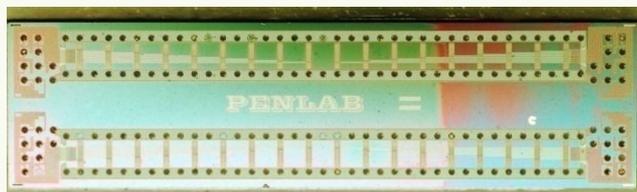
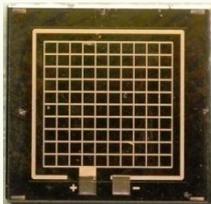
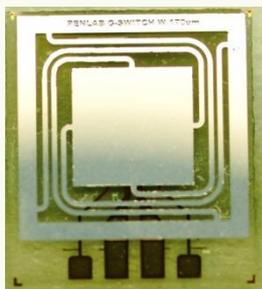
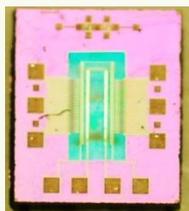
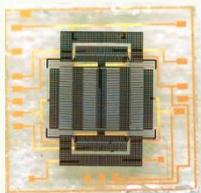
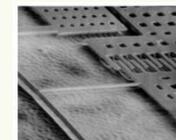
Интернет вещей

What the Internet of Things (IoT) Needs to Become a Reality

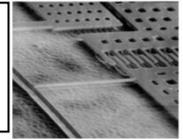




Направления работ

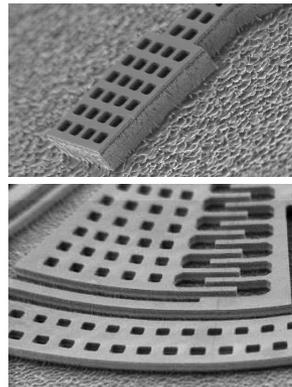
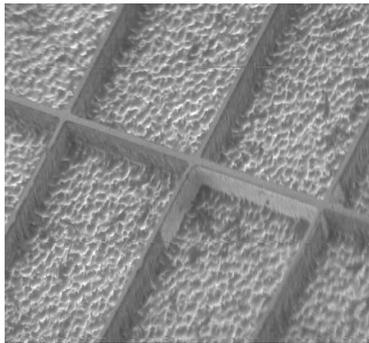


- Гироскопы и акселерометры
- Микромеханические устройства
- Бетавольтаика
- Метрологические приборы
- Микроустройства управления
- Микроактуаторы
- Микрофлюидика
- СВЧ коммутаторы

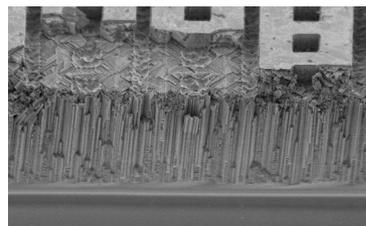
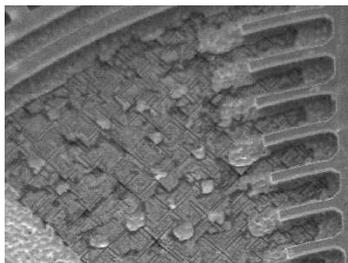


СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МСТ

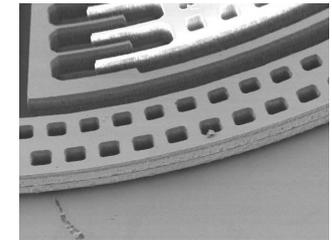
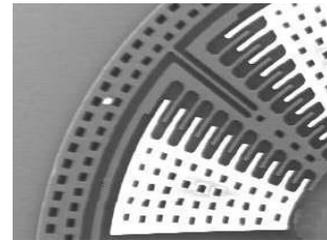
Глубокое реактивное травление



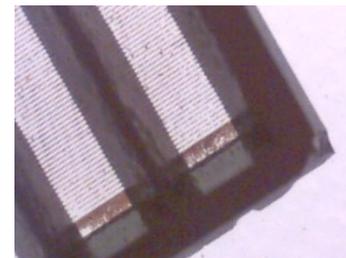
Технология пористого кремния



Сварка кремния со стеклом

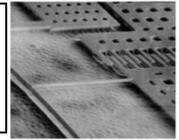


Технология гофрированных мембран



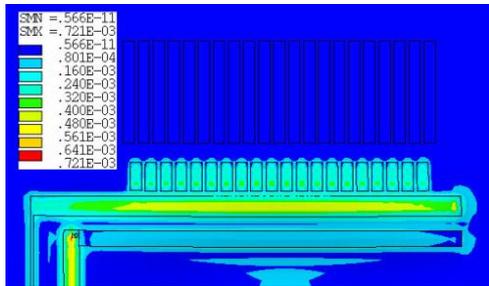
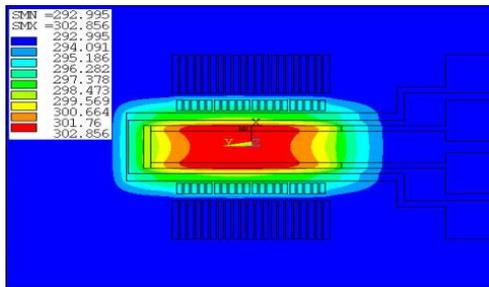
Технология фоточувствительного стекла



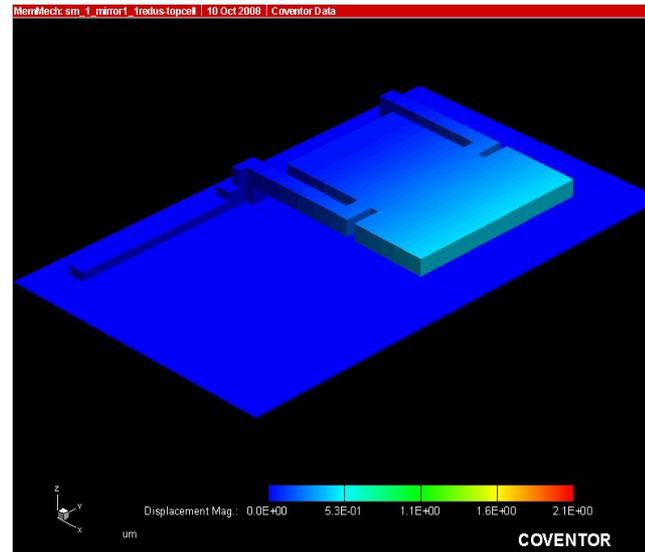


ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

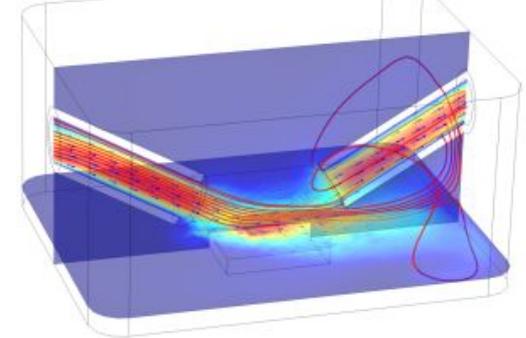
ANSYS



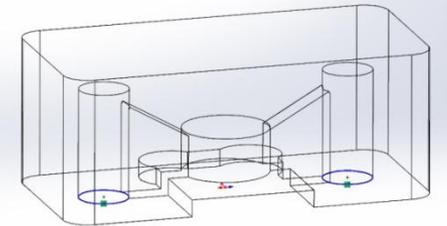
COVENTOR



COMSOL Multiphysics



SolidWorks



More than Moore: Расширение сфер применения

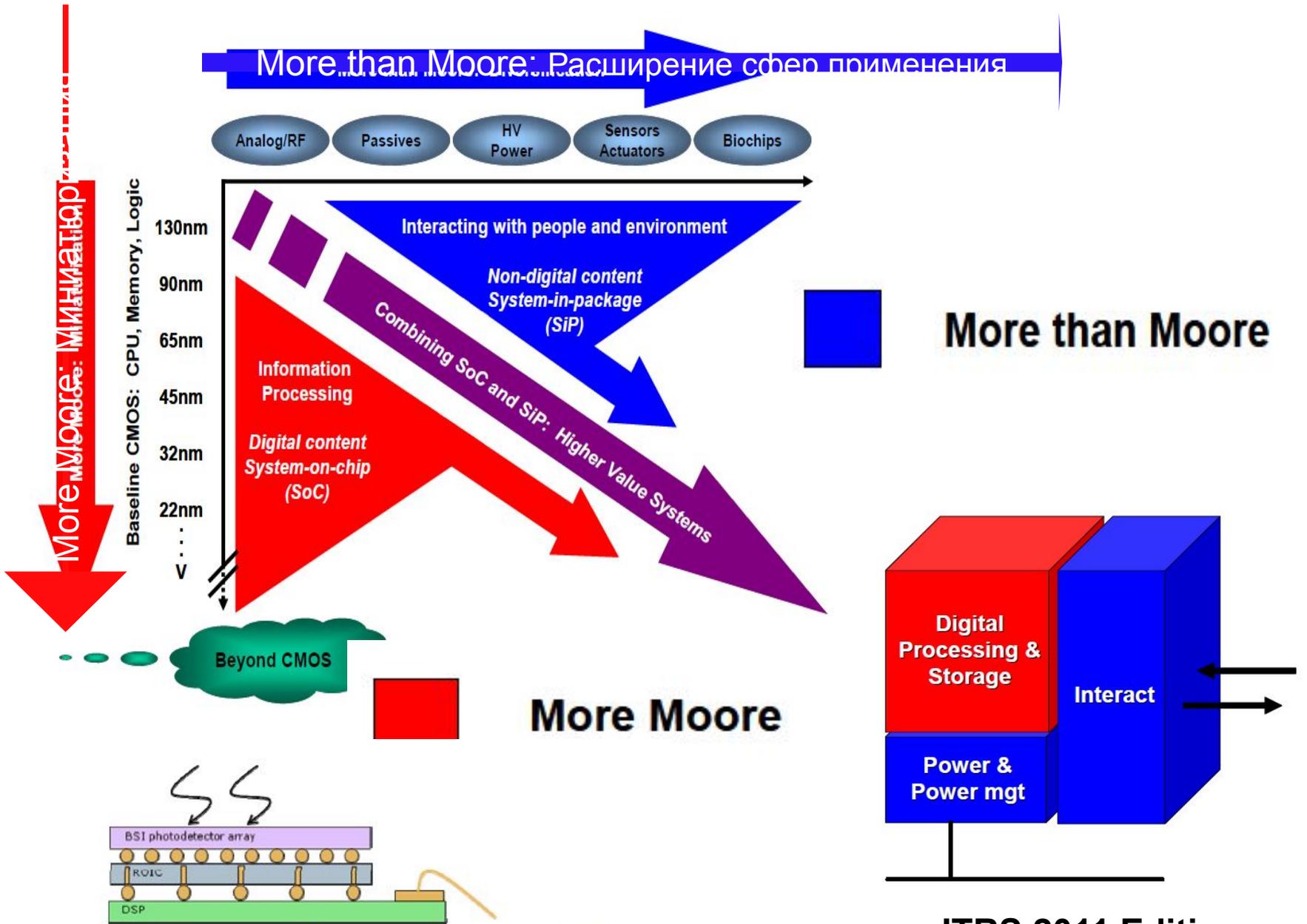


Fig. 5 – 3D integration of a “More-than-Moore” photodetector with “More Moore” read-out and digital signal processing ICs (courtesy of Piet de Moor, IMEC)

ITRS 2011 Edition

Дорожная карта эволюции МЭМС

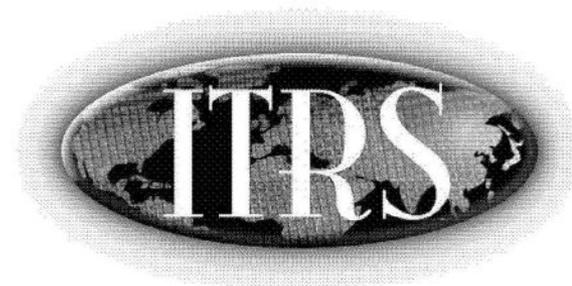


MEMS Technology Roadmapping

Michael Gaitan, NIST
Chair, iNEMI and ITRS MEMS Technology Working Groups

Nano-Tec Workshop 3
31 May 2012

Стратегический план развития полупроводниковых технологий (ITRS)



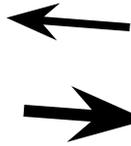
MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS
(MEMS)

2011 EDITION

Разработка



Полный цикл



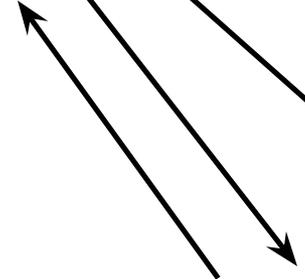
Производитель



Внешнее моделирование



Внешнее производство



Внешнее корпусирование

Внешнее тестирование

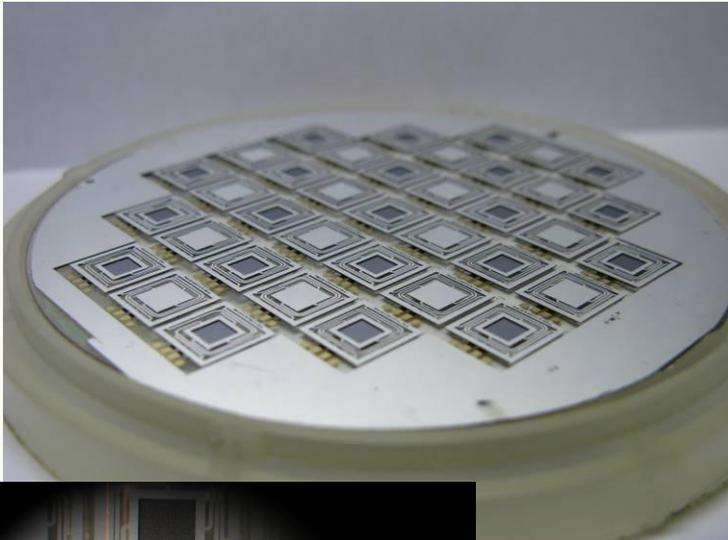
Всего в мире около 30 фирм с полным циклом

на сегодня в РФ создается 1..3 линии с ~ полным циклом

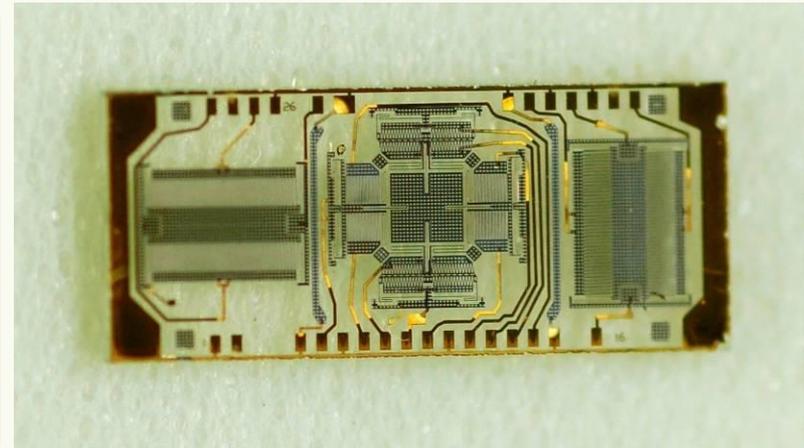
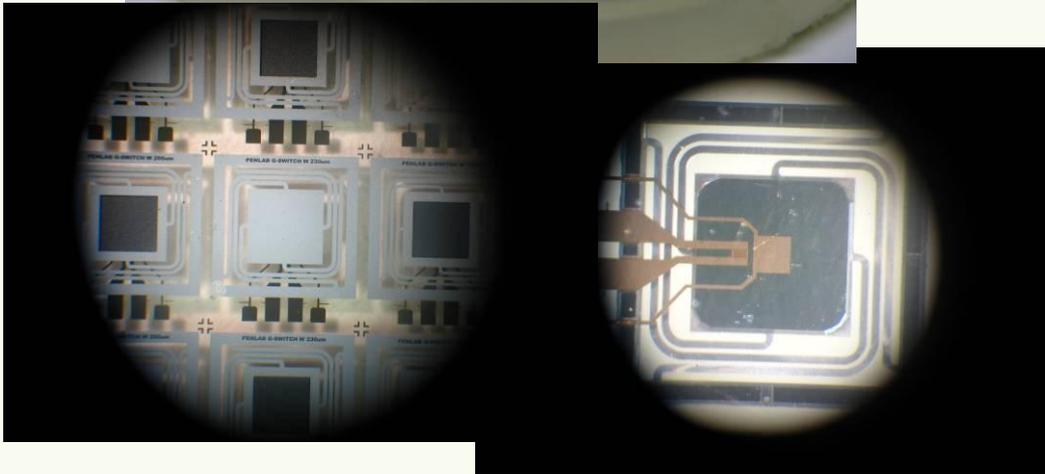
В мире более 300 фирм с неполным циклом

- В России существует научно исследовательская база для разработки МЭМС-устройств.
- Массовое производство МЭМС устройств в России находится на ранней стадии становления.
- Все существующие производители МЭМС-устройств выпускают узкоспециализированную продукцию для конкретных потребителей.
- На сегодняшний день в России отсутствуют производственные мощности, способные покрыть потребности промышленности в МЭМС-устройствах.

MEMS в системах управления

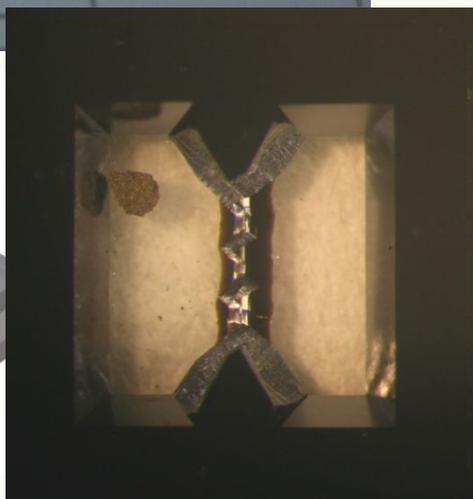
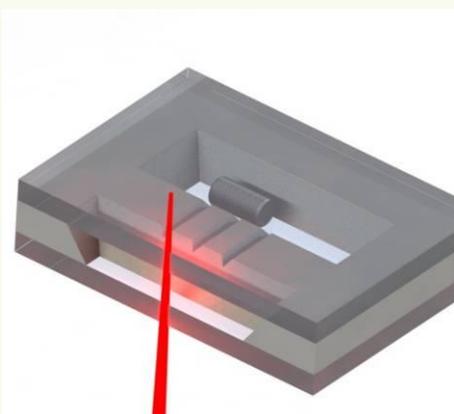
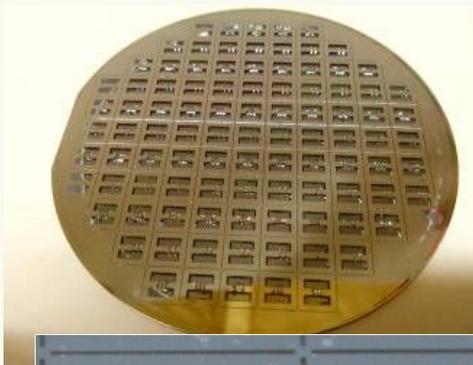


- Системы позиционирования
- Системы координации
- Сенсорика
- Связь



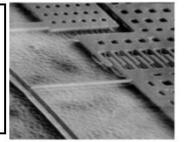


Ячейка атомных часов

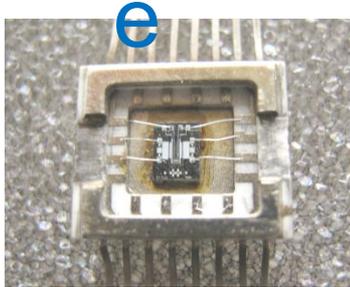


Ячейка атомных часов
заполнена инертным газом
и парами активного
металла.

Отработана технология
заполнения **Неоном** и
парами **Цезия** или **Рубидия**.



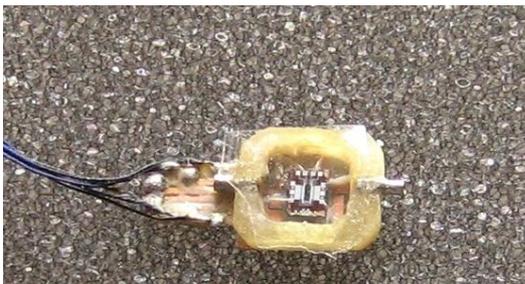
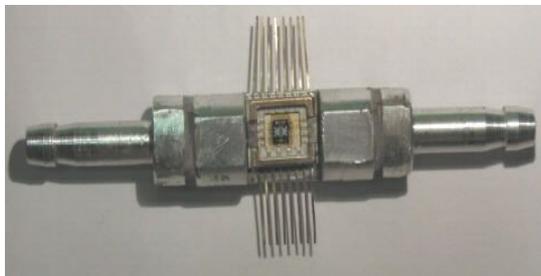
корпусировани



Modif - Flat -16

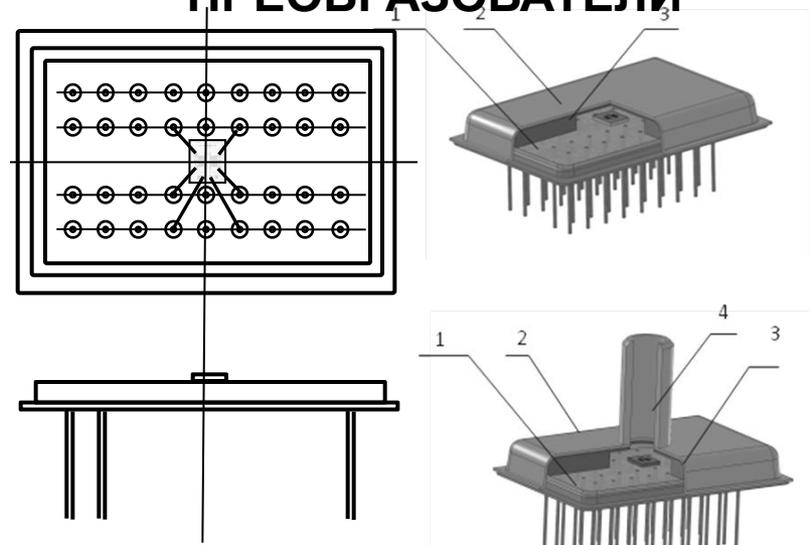


TO-8 3101.8

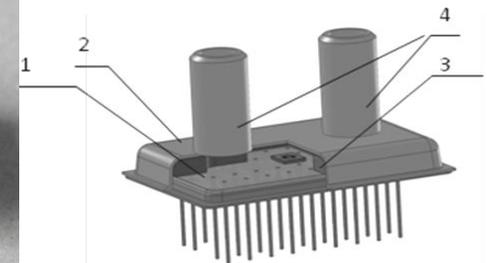


Non standard

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



Modif 155.36-2



Турбореактивные двигатели

Active Stall & Surge Control•

Dynamic Pressure Measurements
Stall & Surge Pressures



Диапазоны измеряемых
давлений

1..... 100 атм

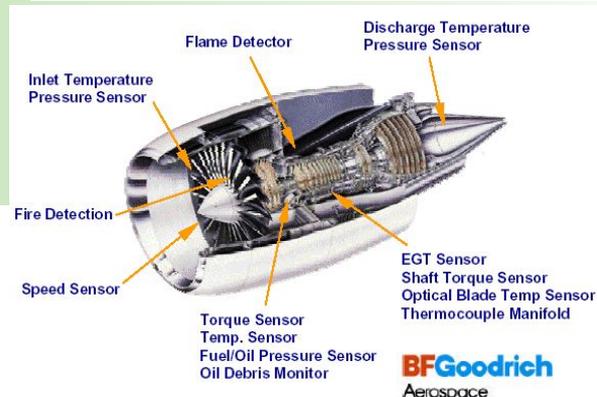
XTHL-312

Диапазон температур
-50 540°C

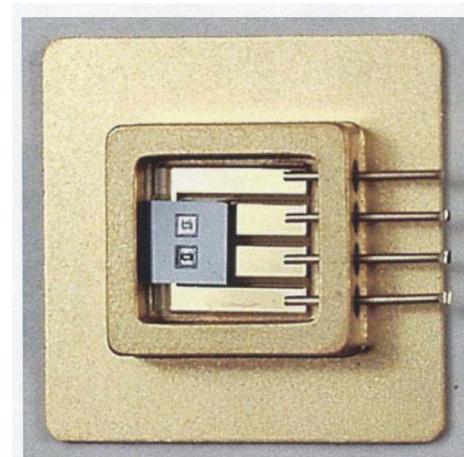
WCT-312

Диапазон температур
-50 640°C

MEMS-Enhanced Jet Engine

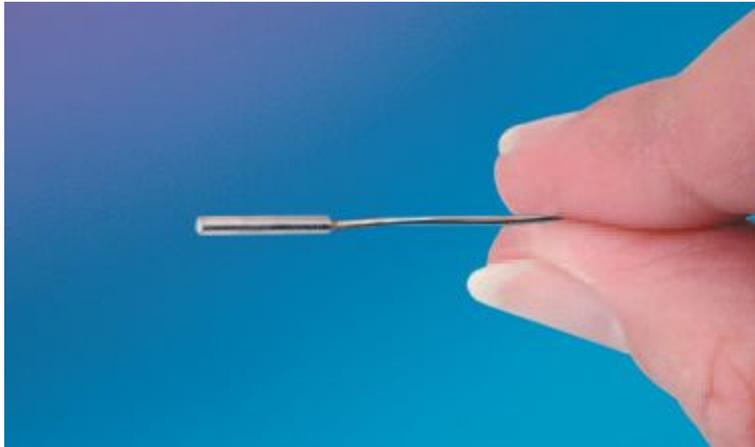


Диапазон частот
0..... 100 кГц

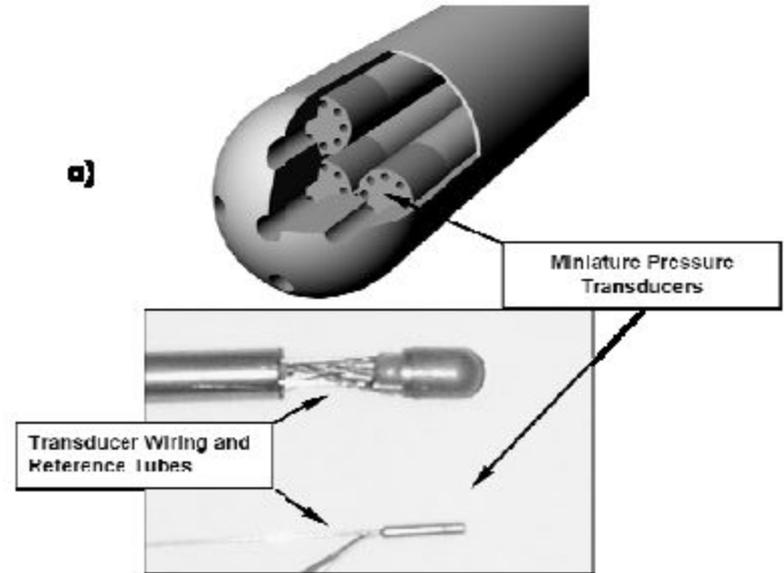


G-sensitivity: < .000001% FS/g

**FLOW ANGLE PROBE
MINIATURE IS® PRESSURE
TRANSDUCER
FAP-250 SERIES**

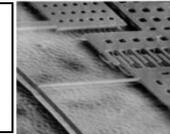


a)

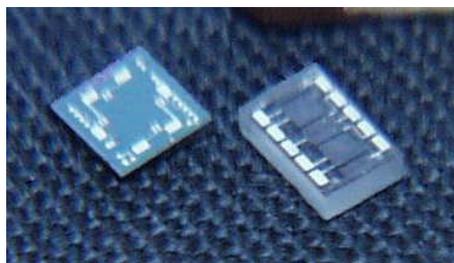


A 6.35 mm, 5-hole, fast-response probe. The probe has five Kulite XCS-062 transducers





ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

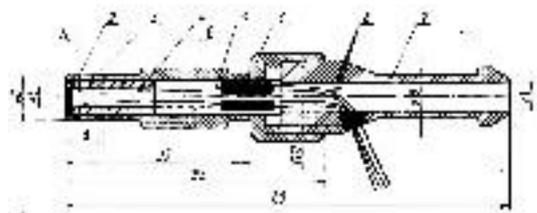


Кремниевые
чипы

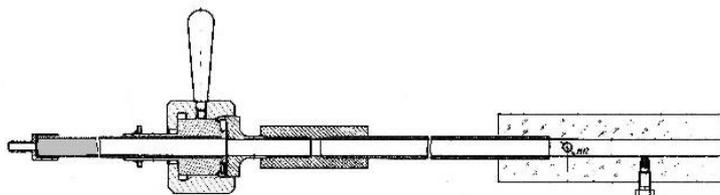
ЛПИ 1978

Низкопрофильные датчики для
установки на поверхности
аэродинамических моделей

Многоцелевой датчик болтового типа



Ударная труба для динамической градуировки датчиков

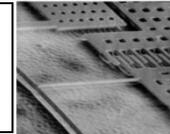


Кремниевые чипы
толщиной **0,4 мм**

Мембрана
толщина 5..50мкм
площадь **1,2*0,8 мкм**

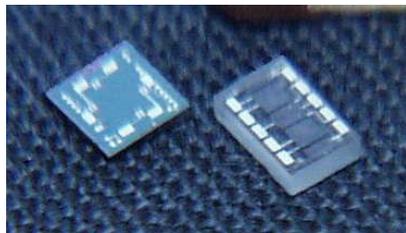


Диапазоны давлений 0...10 кПа, 0...1 МПа,
Частотный диапазон 0...20 кГц;

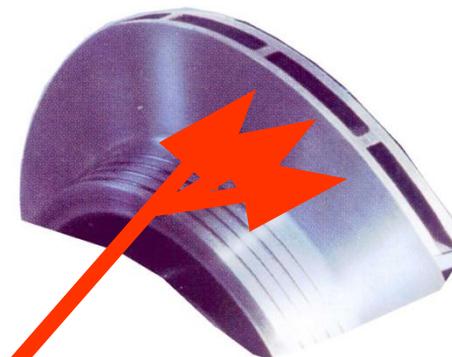
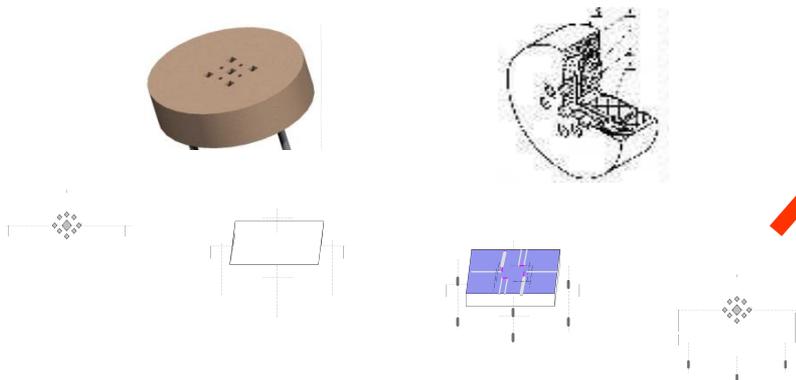


ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

для исследования турбомашин

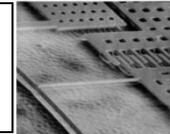


Датчики для установки
на рабочие колеса турбомашин

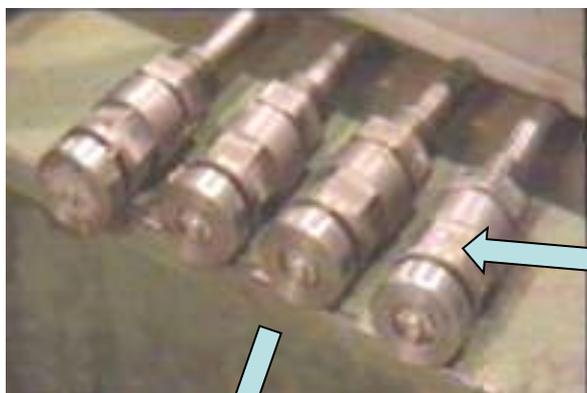


РАБОЧЕЕ КОЛЕСО
ЦЕНТРОБЕЖНОГО
КОМПРЕССОРА

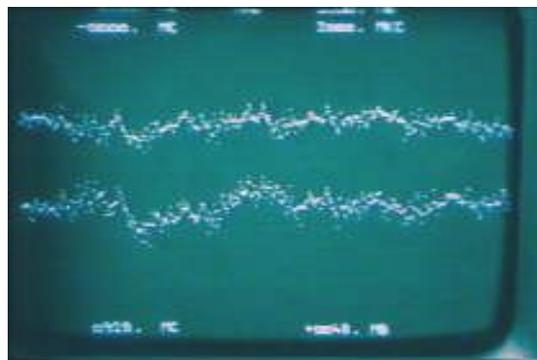
Работоспособность при уровне
центробежных ускорений до 30000 g



ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА для мониторинга турбомашин



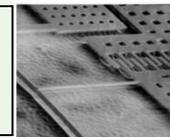
Испытания система
антипомпажной защиты





Петербургский Государственный
Политехнический Университет

Лаборатория нано- и
микросистемной техники



Испытания система антипомпажной защиты

