

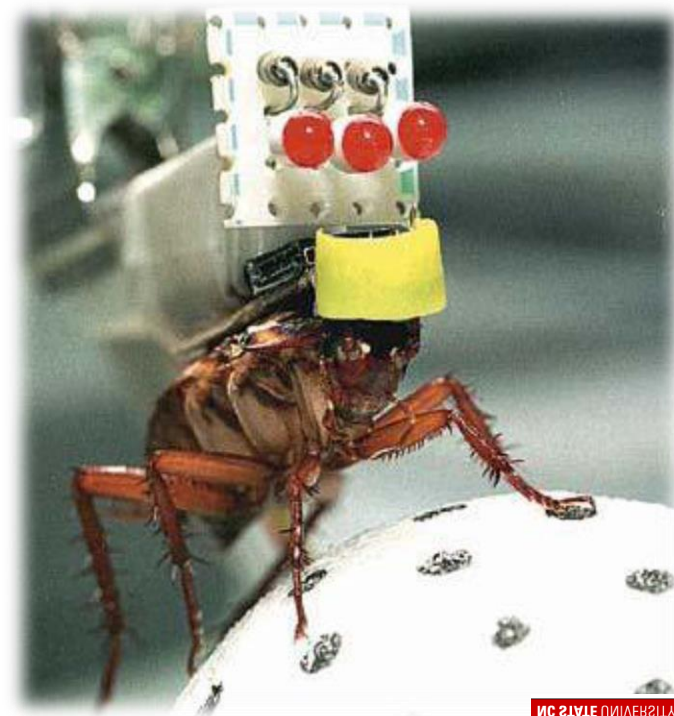


# МИКРОСИТЕМИТЕ И МЕМС - ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНИ И МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНИ, КОМПЛЕКСНИ И РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

20.10.2017 г.

1

Проф. д-р Тодор Тодоров  
Катедра: Теория на механизмите и машините  
Машинно-технологичен факултет  
Технически университет – София  
[tst@tu-sofia.bg](mailto:tst@tu-sofia.bg)  
20 October 2017





## СЪДЪРЖАНИЕ

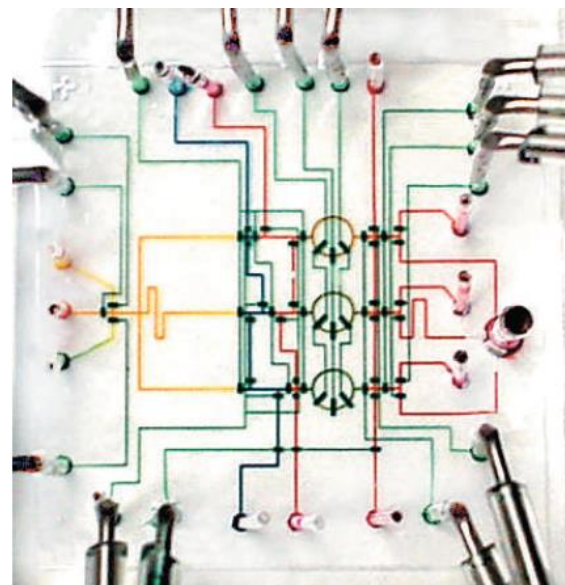
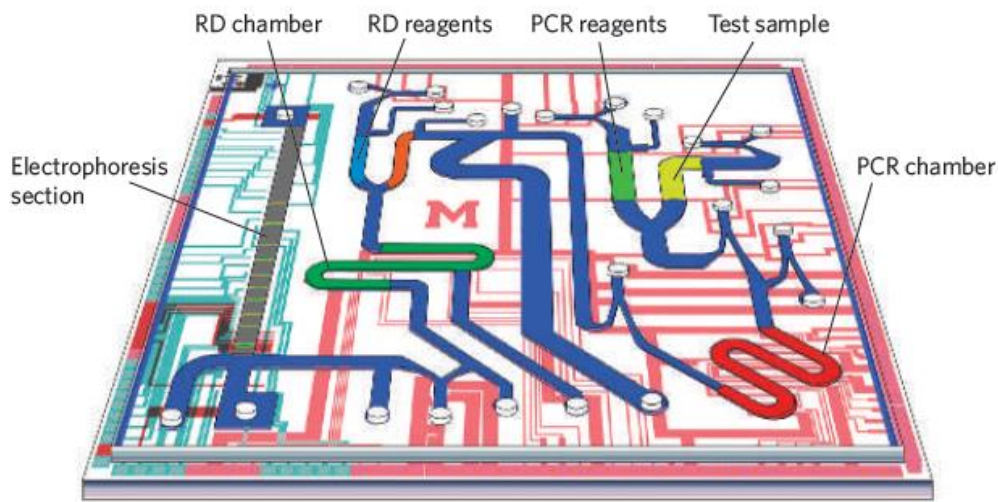
- Микросистеми или MEMS?
- Как се появяват и докъде стигат MEMS?
- MEMS в индустриалните революции
- Архитектура на MEMS
- MEMS - низ от революционни решения
- Интердисциплинарен и мултидисциплинарен характер на MEMS
- Отличителни характеристики
- Литература



## МИКРОСИСТЕМИ ИЛИ МЕМС?

□ **Микросистеми** – много **малки системи** изработени от много **малки компоненти**, които вършат нещо интересно, или нещо полезно [2 Senturia] .

- наименованието **микросистеми** не се свързва със специфични технологии и няма изисквания за специфични функции.





# МИКРОСИСТЕМИ ИЛИ МЕМС?

## □ МЕМС

- **Микро** – обозначена е размерната скала (от 1мм до 1  $\mu\text{m}$  [1]) или от няколко nm до 1 mm [2];
- **Електро** – електричество, електроника или и двете;
- **Механични** – включва движещи се части [2];
- **Технология** – базирана на микромашинни процеси, съвместими със силициево базираната CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) електроника;
- **Система** – напълно завършен продукт „системи върху чип“ (“systems-on-a-chip”) с действие в микроскалата и ефект в макро устройствата.
- МЕМС устройствата усещат, мислят, действат и комуникират.



## МИКРОСИСТЕМИ ИЛИ МЕМС?

- МЕМС – термин, който се разпростира и върху термо, магнитни, флуидни и оптични устройства **без движещи се части.**

Микросистема = МЕМС [1], [2],[3]

MST – microsystem technology (Европа), MEMS – USA, Australia, Israel, Micromachines Microrobotics - Япония

### **МЕМС продуктите включват**

- **Микро сензори** (акустични вълни, биомедицински, химични, инерционни, оптични, налягане, лъчисти, топлинни)
- **Микро актуатори** (клапани, помпи, микрофлуидни електрически и оптични релета и ключове, хващачи, ножици, линейни ротационни мотори)
- **Четящо/записващи глави** в компютърни запамятаващи системи..
- **Глави на мастилено-струйни принтери.**
- **Микро генератори на енергия** - от няколко стотни от  $\mu W$  до няколко  $mW$ .
- **Компоненти и микроустройства** (резонатори, мини роботи и играчки, екипировка за микрохирургия или телекоми)



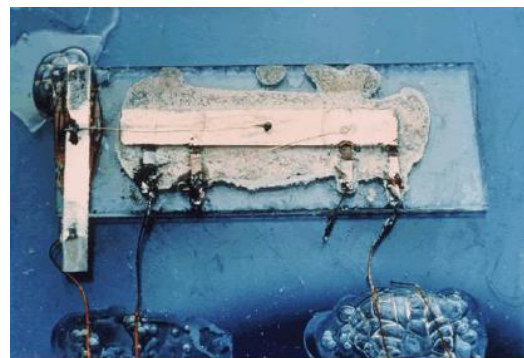
## КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

20.10.2017 г.



1947, William Shockley, John Bardeen и Walter Brattain от Bell Laboratories изграждат първият транзистор.  
*„Третата индустриална революция на човешката цивилизация“*

1954 Пиезорезистивния ефект в Ge и Si (C.S. Smith)

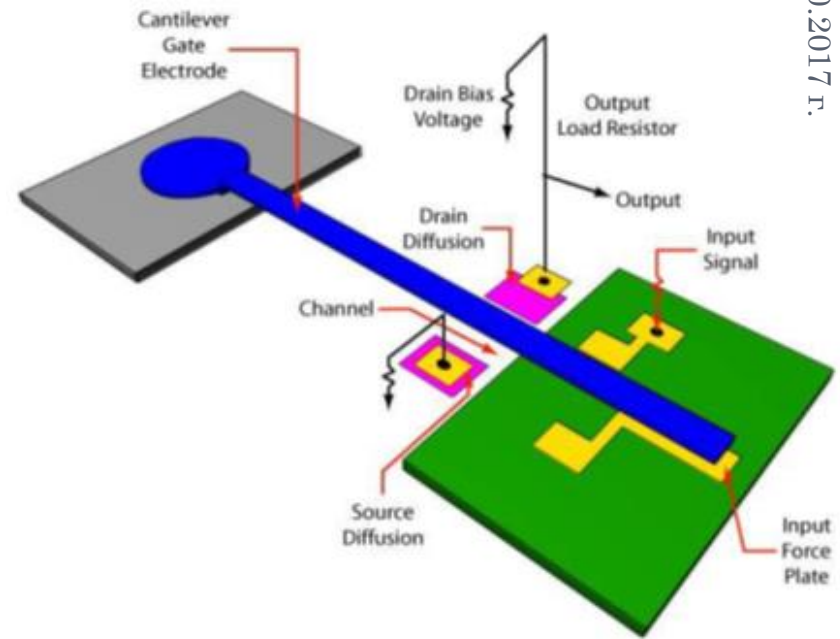


1958, Jack Kilby (нобелов лауреат) от TI създава първата интегрална схема "Solid Circuit" върху Ge чип: 1 транзистор, 3 резистора, и 1 кондензатор. Robert Noyce подобрява ИС.



## КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

- 1964 г. Harvey Nathanson от Westinghouse произвежда серийно първото МЕМС устройство.
- То свързва механичен компонент с електронни елементи и е наречено **Гейт резонансен транзистор (RGT)**.
- RGT е златна резонираща MOS гейт структура.
- Дължина 1 mm.
- Служи за честотен филтр в ИС.
- RGT е първата демонстрация на електростатичен актуатор.
- Това също е **първата демонстрация повърхностна микромашинна технология.**

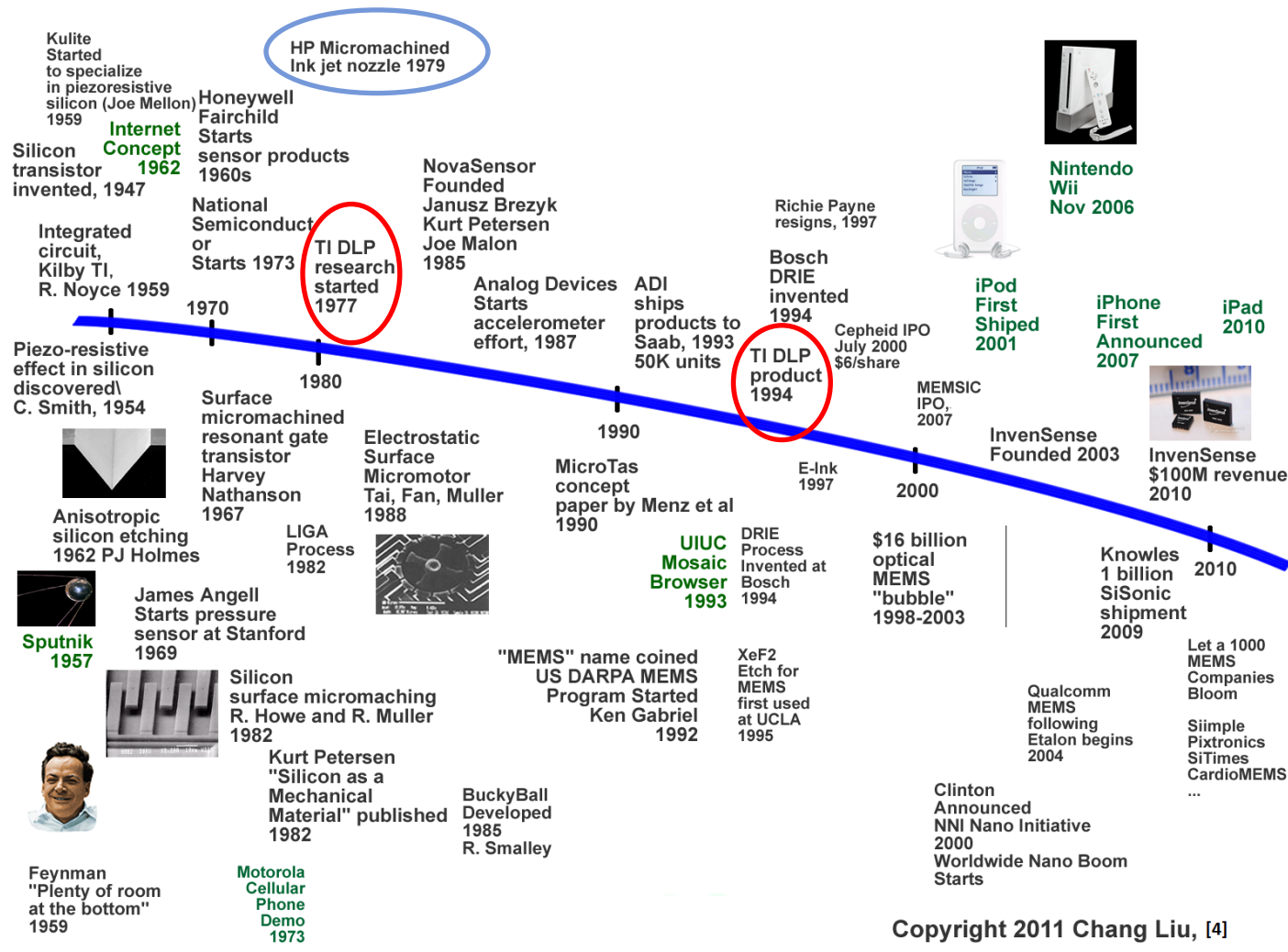


20.10.2017 г.



# КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

20.10.2017 г.

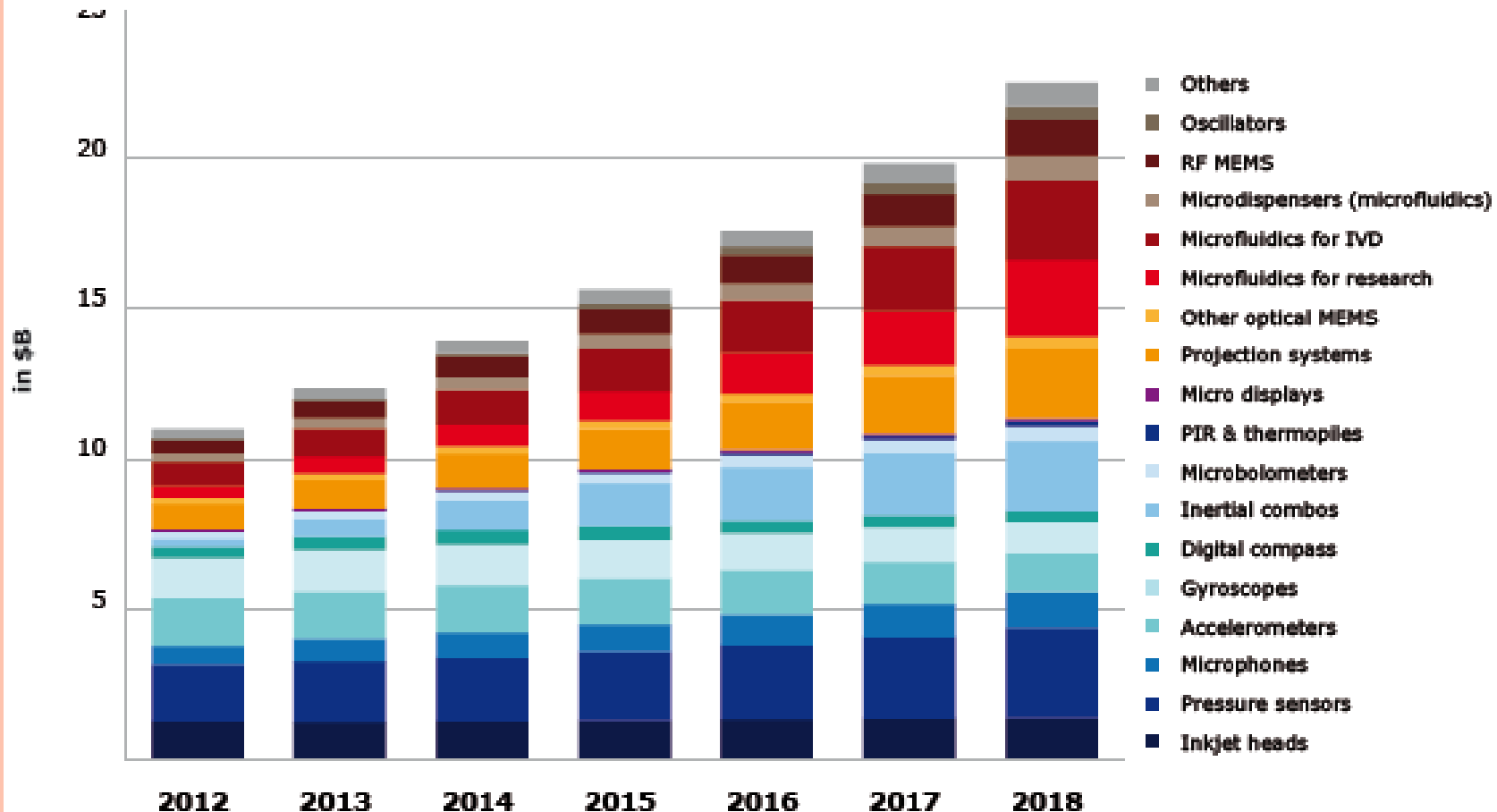






## КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ MEMS?

20.10.2017 г.



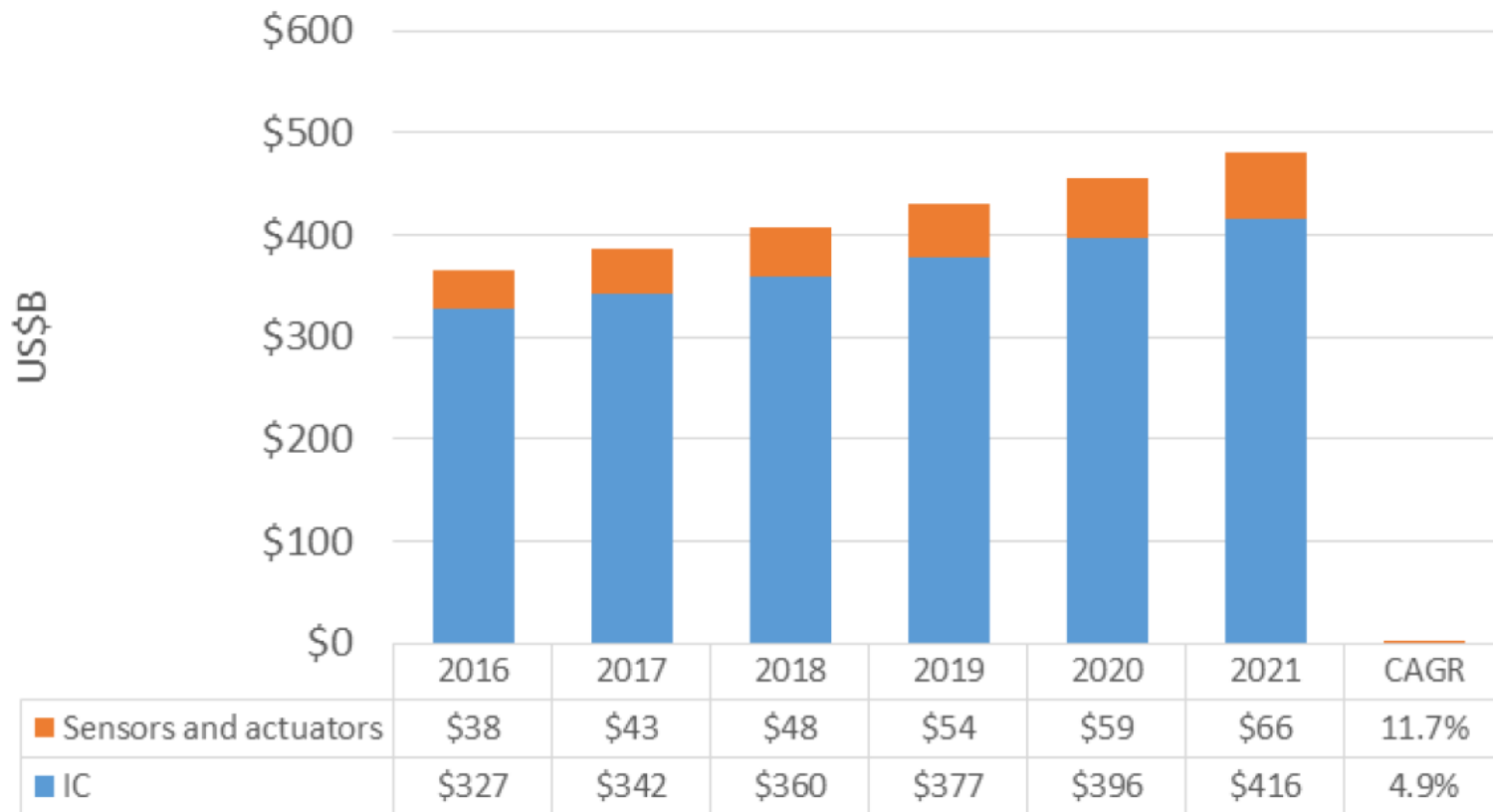
Изследванията на *Yole Développement* показват, че MEMS сектора постига 10% ръст от 2012 до 2013 г. като достига \$11B оборот. Експертите очакват 12-13% CAGR до 2018, което да доведе до пазар на MEMS от \$22.5B и нарастване на произведените елементи до 23.5 милиарда броя [7].



# КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

20.10.2017 г.

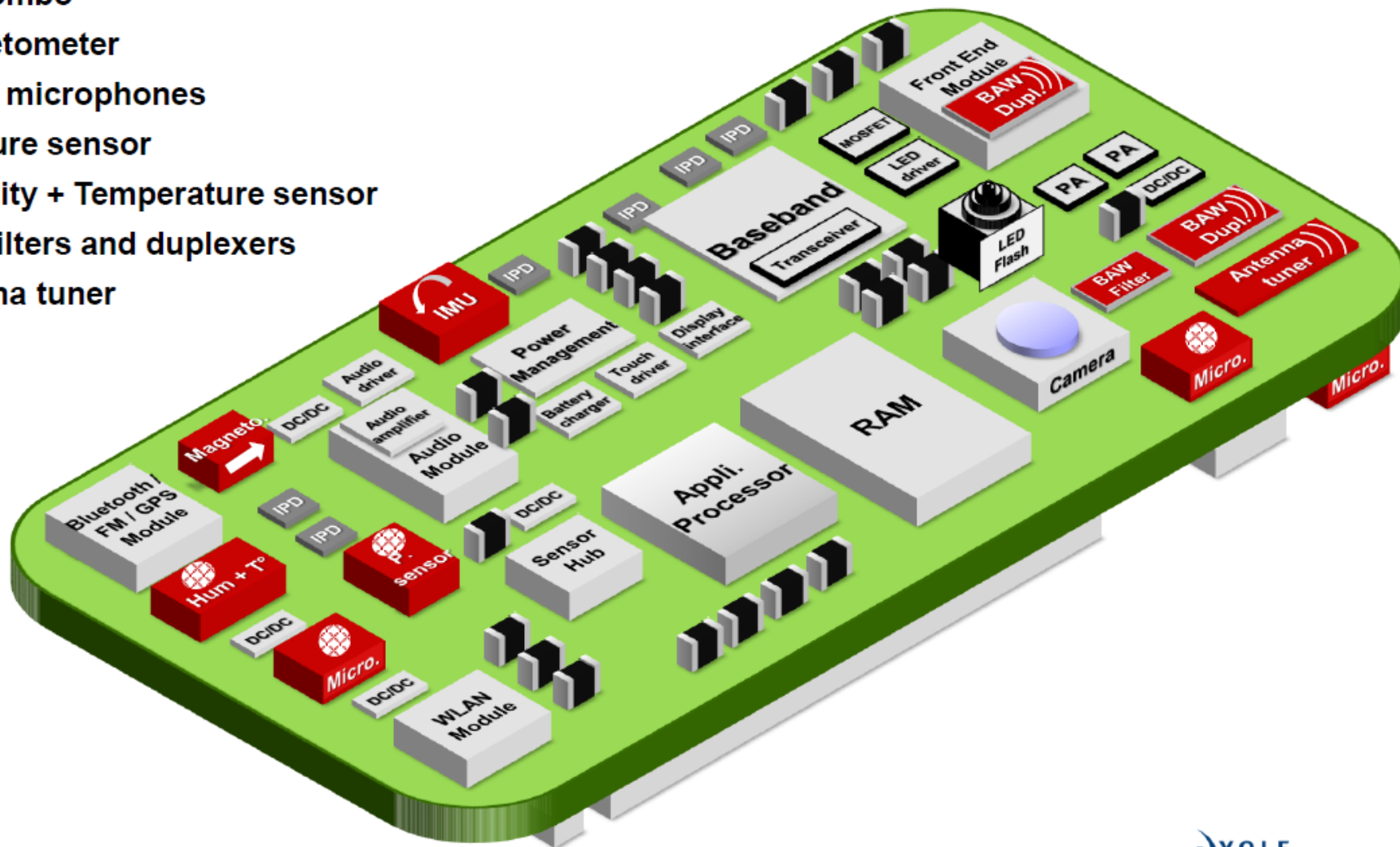
Sensors and Actuators vs. IC forecast



# Simplified view of TODAY (2013's) smart- phone board **MEMS in red**

## MEMS devices in volume in 2013:

- IMU combo
- Magnetometer
- MEMS microphones
- Pressure sensor
- Humidity + Temperature sensor
- BAW filters and duplexers
- Antenna tuner

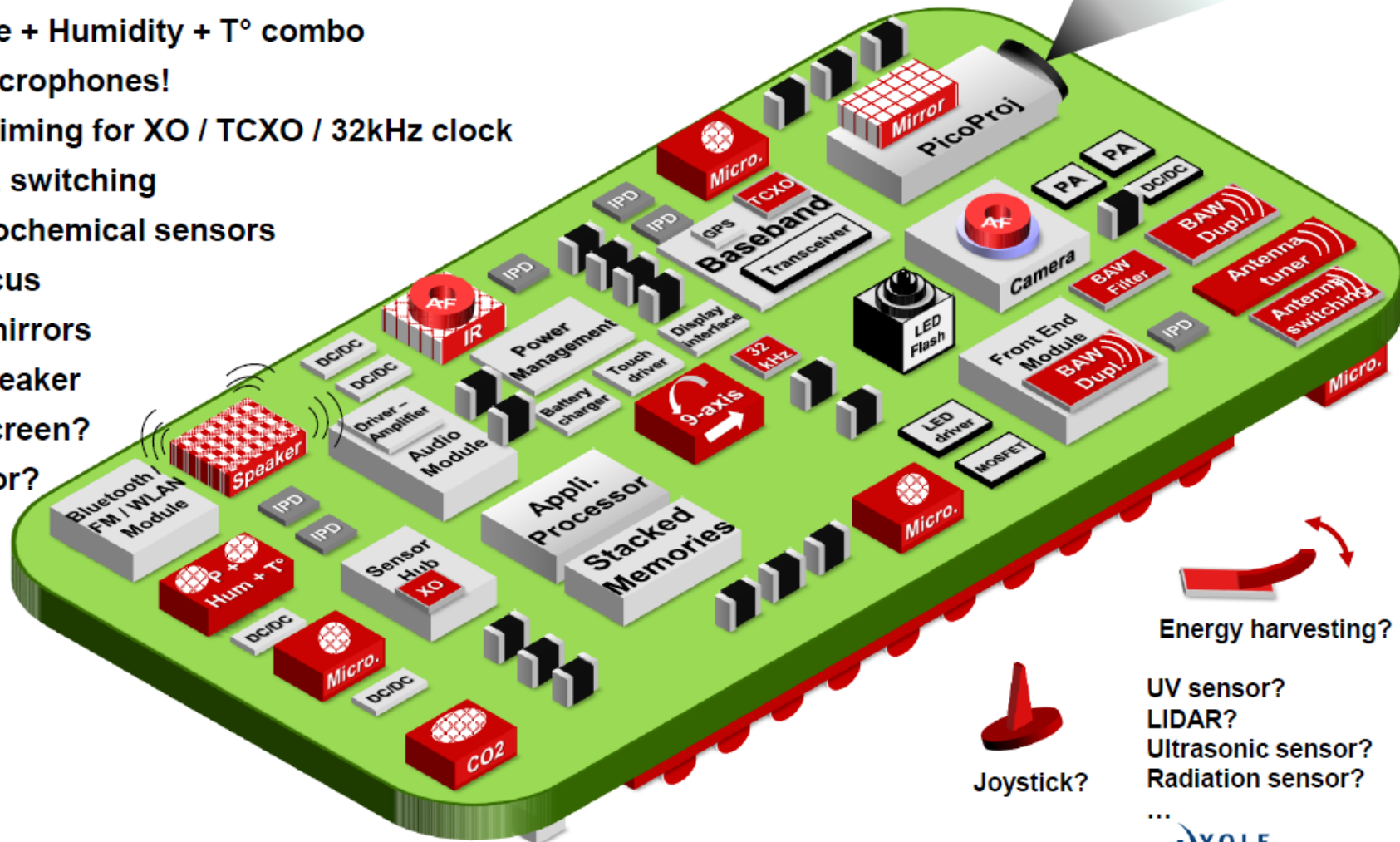


# Simplified view of TOMORROW (2018's) smart-phone board

**MEMS in red**

## New MEMS devices in volume in 2018?

- 9-axis combo
- Pressure + Humidity + T° combo
- More microphones!
- Silicon timing for XO / TCXO / 32kHz clock
- Antenna switching
- Gas / biochemical sensors
- Auto-focus
- MEMS mirrors
- Microspeaker
- Touchscreen?
- IR sensor?



Energy harvesting?

UV sensor?  
LIDAR?  
Ultrasonic sensor?  
Radiation sensor?

Joystick?

# MEMS value proposition in mobile devices

High volume  
Small production  
Sampling / R&D

## Better communication performances

DelfMEMS switch



Wispry antenna tuner on cell phone board



Sand 9 MEMS Oscillator



AudioPixel microspeaker



## Sound quality

Knowles microphones

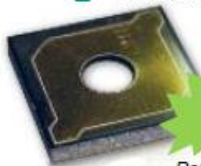


## Improved visual experience

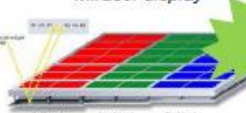
Scanning mirror from Lemoptix



Polight MEMS autofocus



Mirasol display



## Increased battery lifetime

Nectar fuel cell



TI temperature sensor versus a competing thermopile sensor



## Infra red sensing

Thermal imager MuOptics



## Navigation & environment sensing

Sensirion Humidity Sensor



Freescale pressure sensor



STM 9-axis



## New tactile interface

NextInput SoftTouch interface

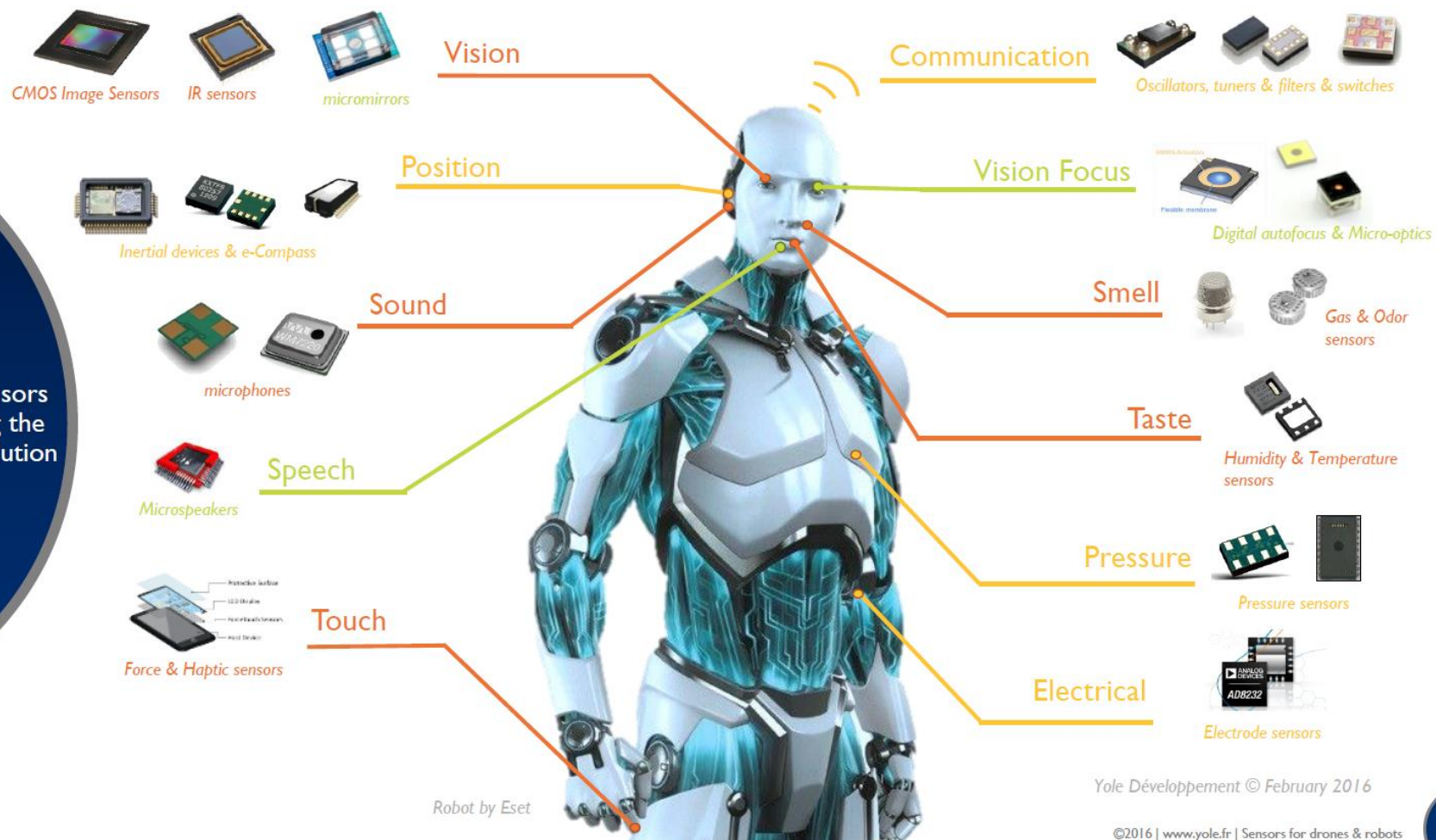




# КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

20.10.2

## MEMS & SENSORS : BEYOND THE HUMAN SENSES...



Mems & sensors are enabling the robotic revolution

Robot by Eset

Yole Développement © February 2016

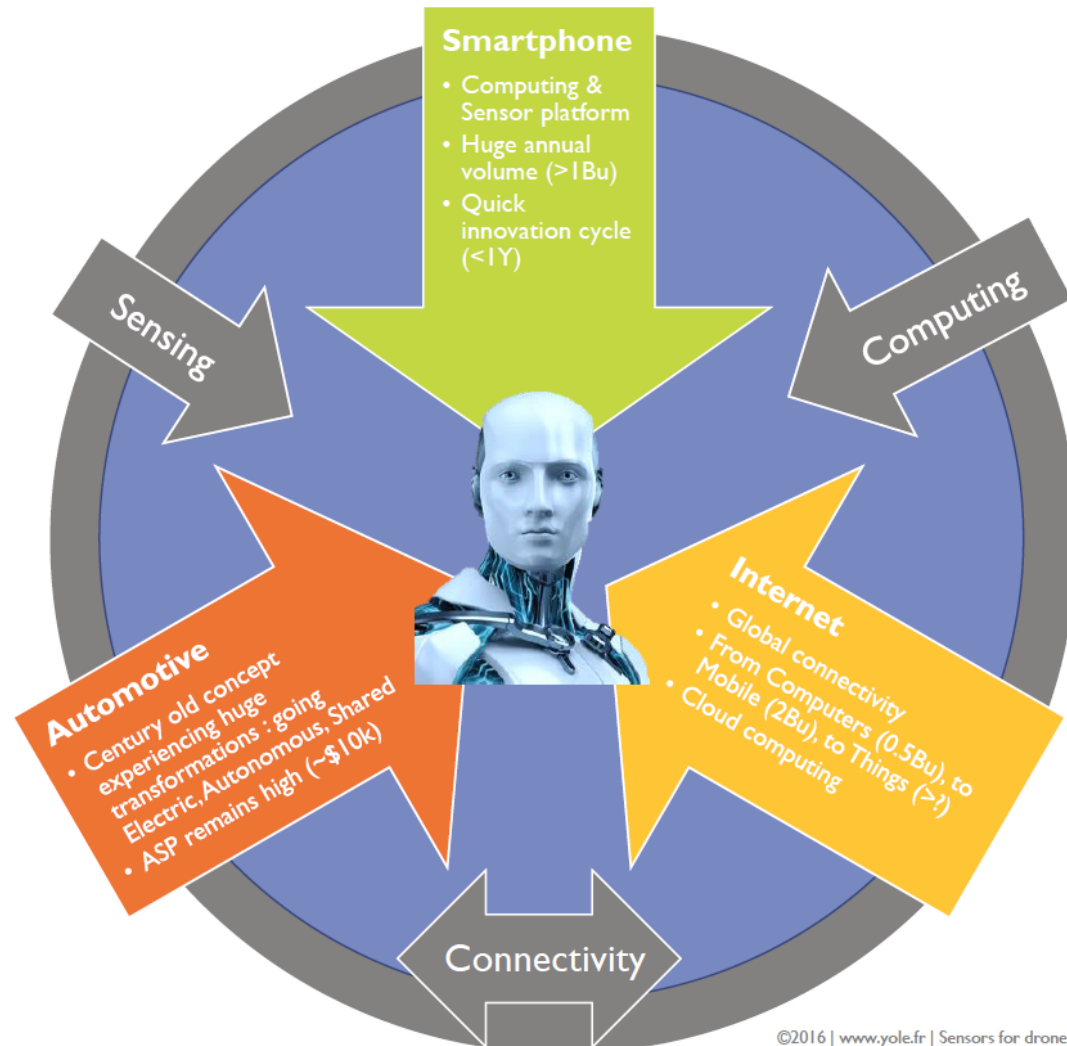


## CONVERGENCES LEADING TO THE ROBOTIC REVOLUTION

### Why now?

- Smartphones helped develop advanced microelectronic technologies at low cost
- Internet is providing communication / cloud computing infrastructure coupled with high demand for connected devices
- Autonomous vehicles R&D allow for high priced technology testbeds fueled by car brand search for differentiation

3 Industries converging for the robotic revolution





# 8 ТИПА РОБОТИ В ЗАВИСИМОСТ ОТ МОБИЛНОСТТА

	Flying	Swimming	4+ Legged	2 Legged	4+ Wheeled	2 Wheeled	Arms	Head
Defense								
Industry								
Security								
Medical								
Transport								
Commercial								
Consumer								

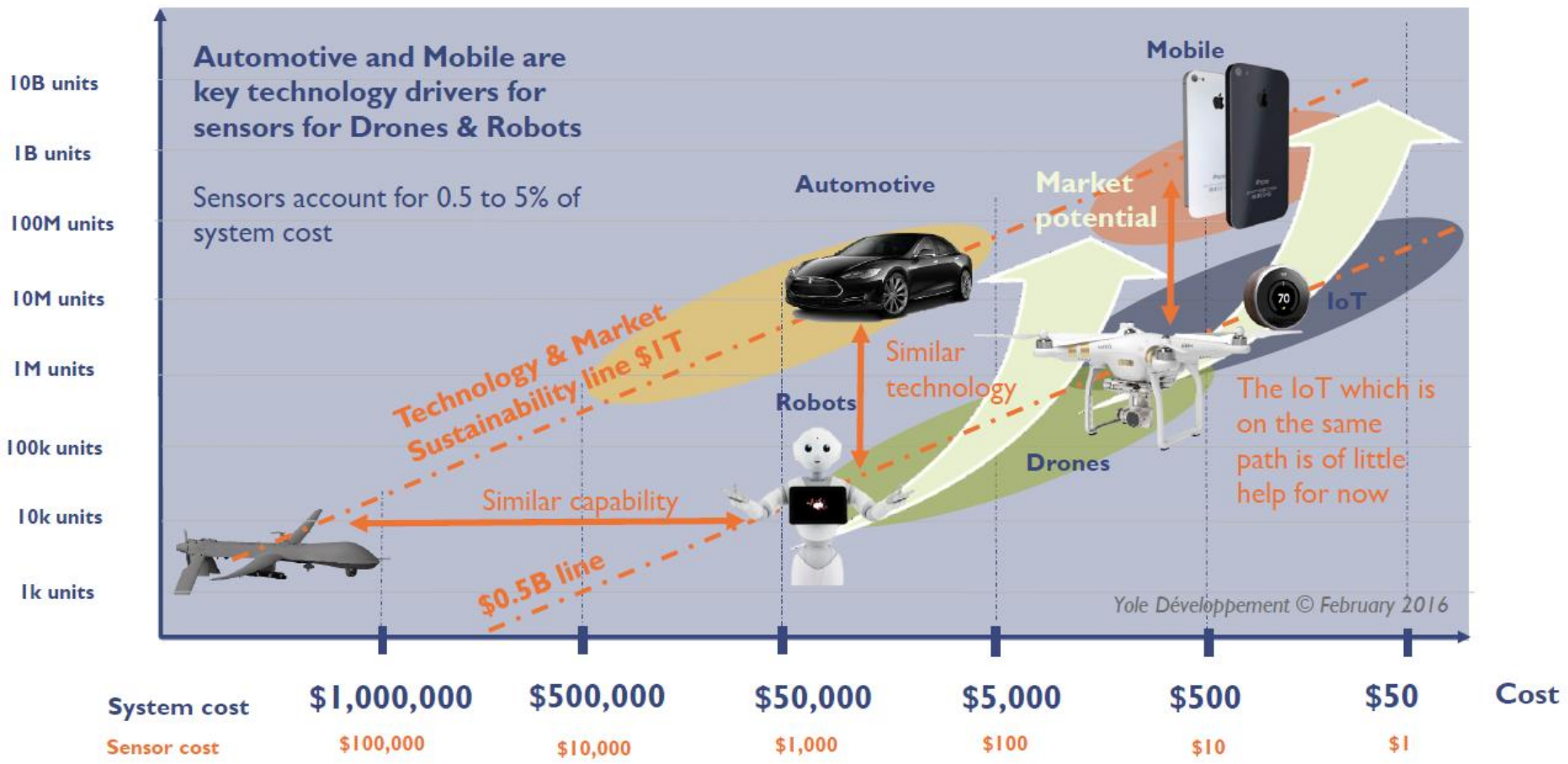




# ПАЗАР НА СЕНЗОРИ ЗА ДРОНОВЕ И РОБОТИ

10.201

Volume





# СЕНЗОРИТЕ И РОБОТИТЕ ИМАТ БЛЕСТЯЩО БЪДЕЩЕ

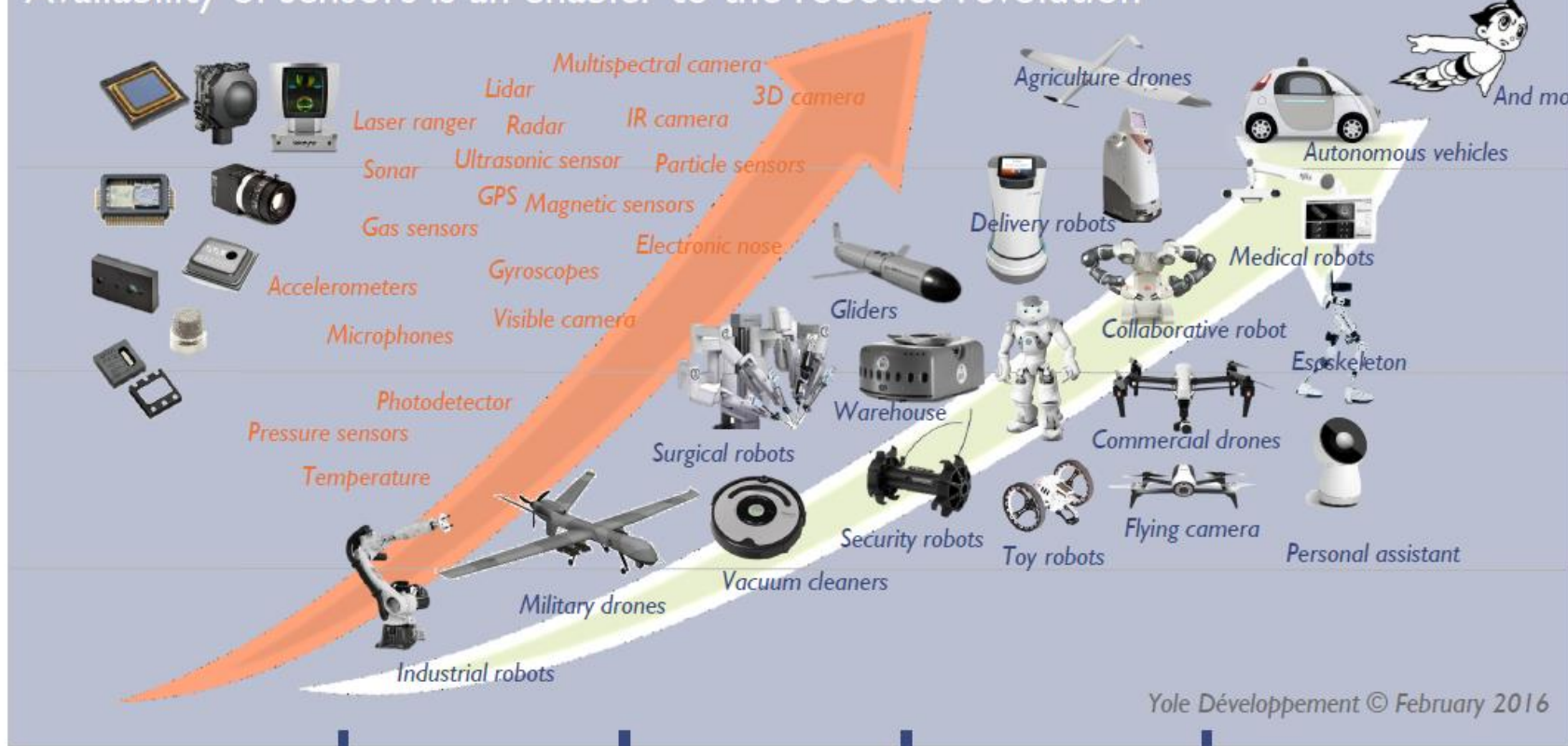
## Technology

Availability of sensors is an enabler to the robotics revolution

Advanced sensing technology

Replication of human senses

Basic sensing technology



1945      40 years      1995      20 years      2015      10 years      2025

Time

Acceleration : The speed of technology change doubles every technology shift

Yole Développement © February 2016

# TECHNOLOGY EVOLUTION WAVES



1<sup>st</sup> Wave

Disruptors  
Communication cost  
MEMS Sensing

2<sup>nd</sup> Wave

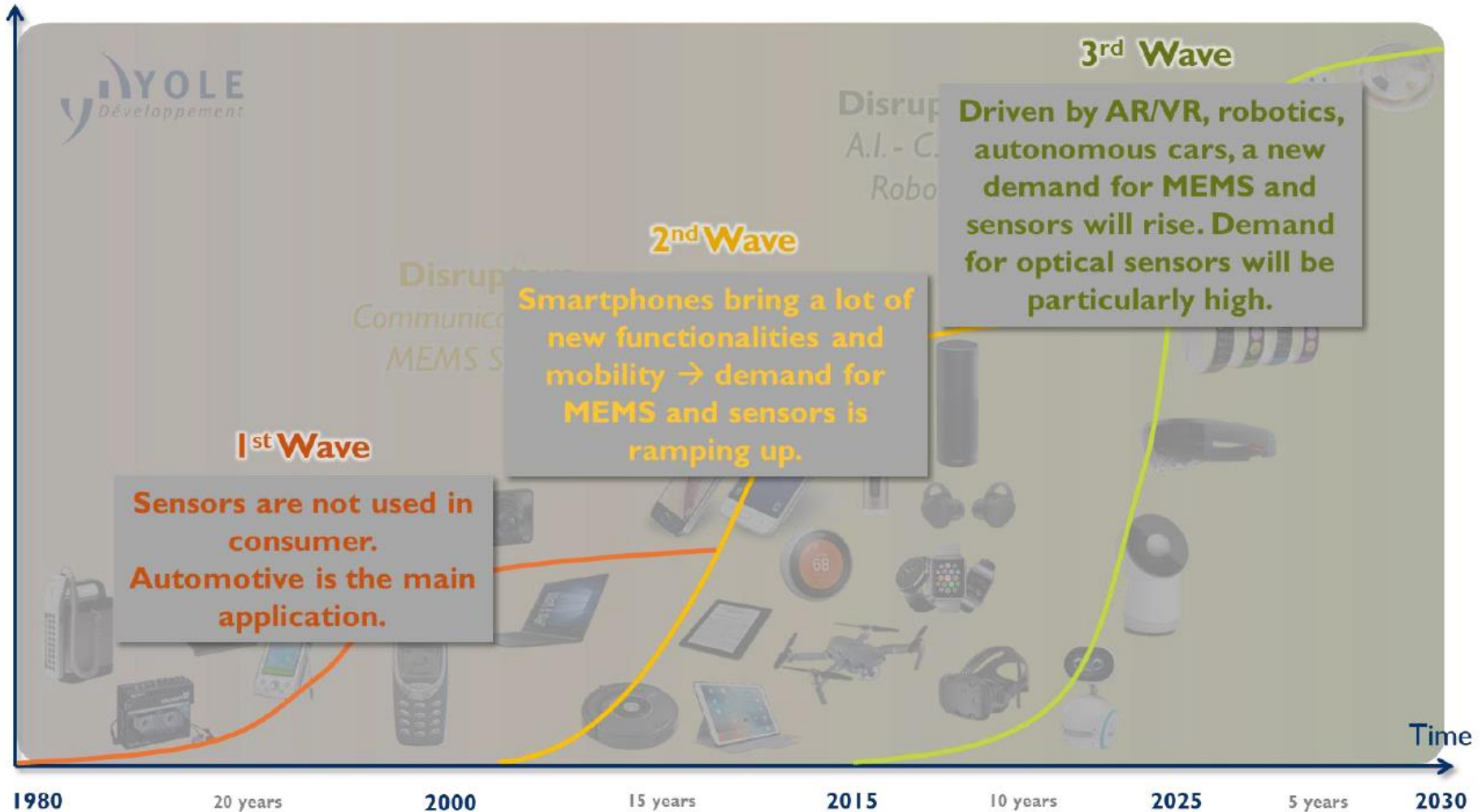
Disruptors  
A.I. - C.N.N.  
Robotics

3<sup>rd</sup> Wave

Time

1980      20 years      2000      15 years      2015      10 years      2025      5 years      2030

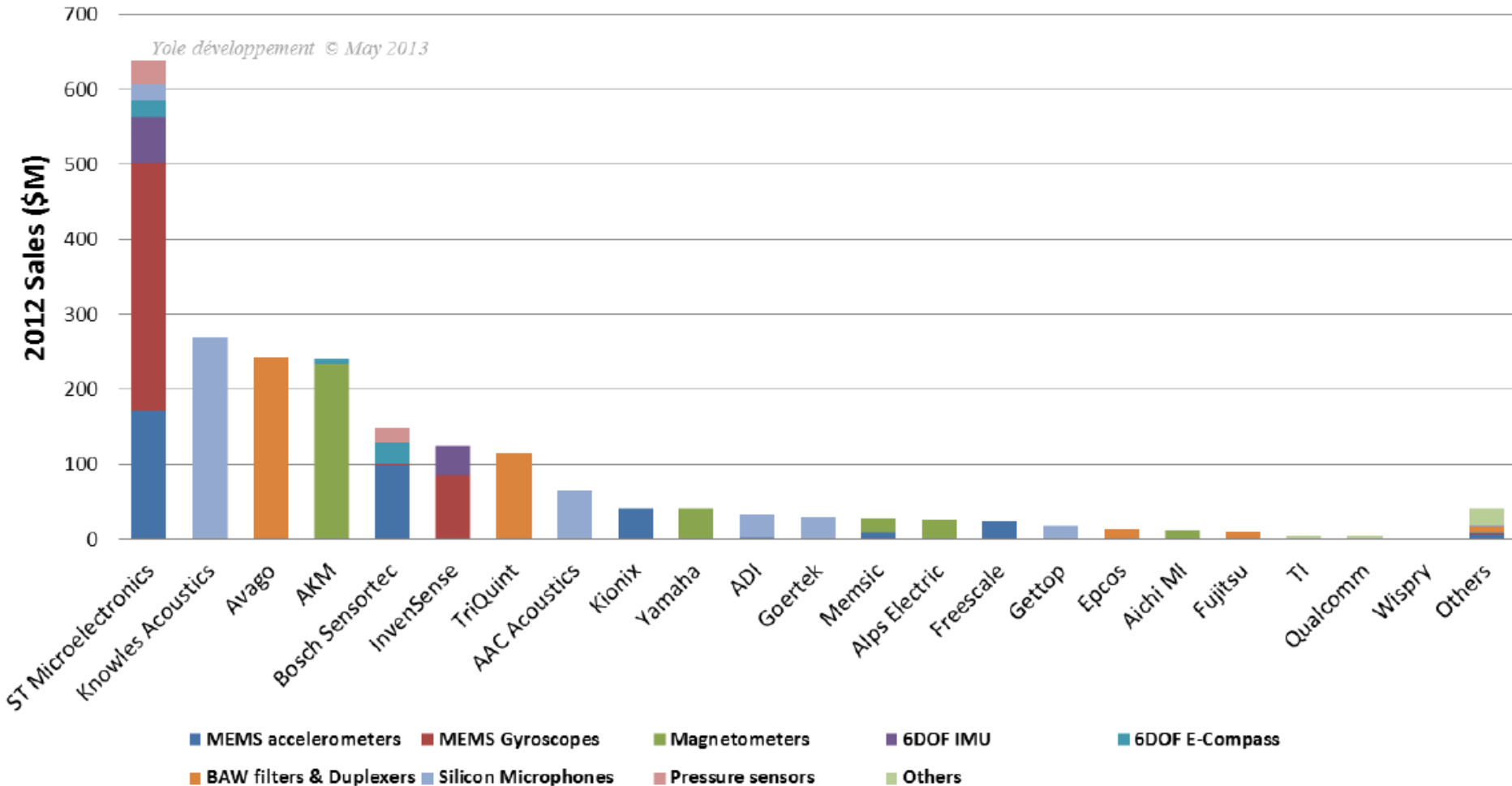
# TECHNOLOGY EVOLUTION WAVES



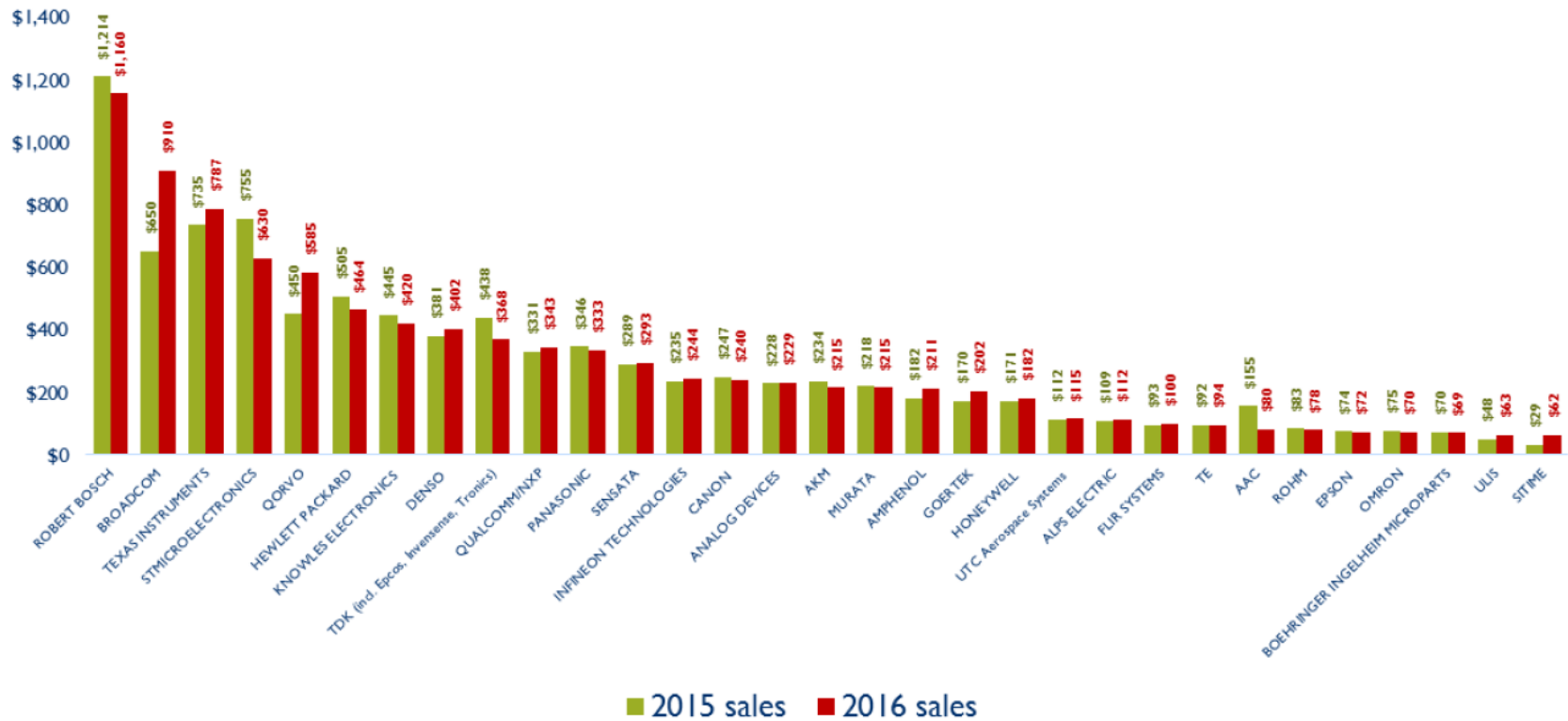
# Successful companies are still large leaders in distinct MEMS categories

Top 4 players have >50% market shares on 5 different MEMS markets,  
although it starts to decrease in some cases

**Top MEMS Suppliers in the Mobile Phone and Tablet Market**  
- 2012 Revenue (\$M) - Breakdown by Product Type -



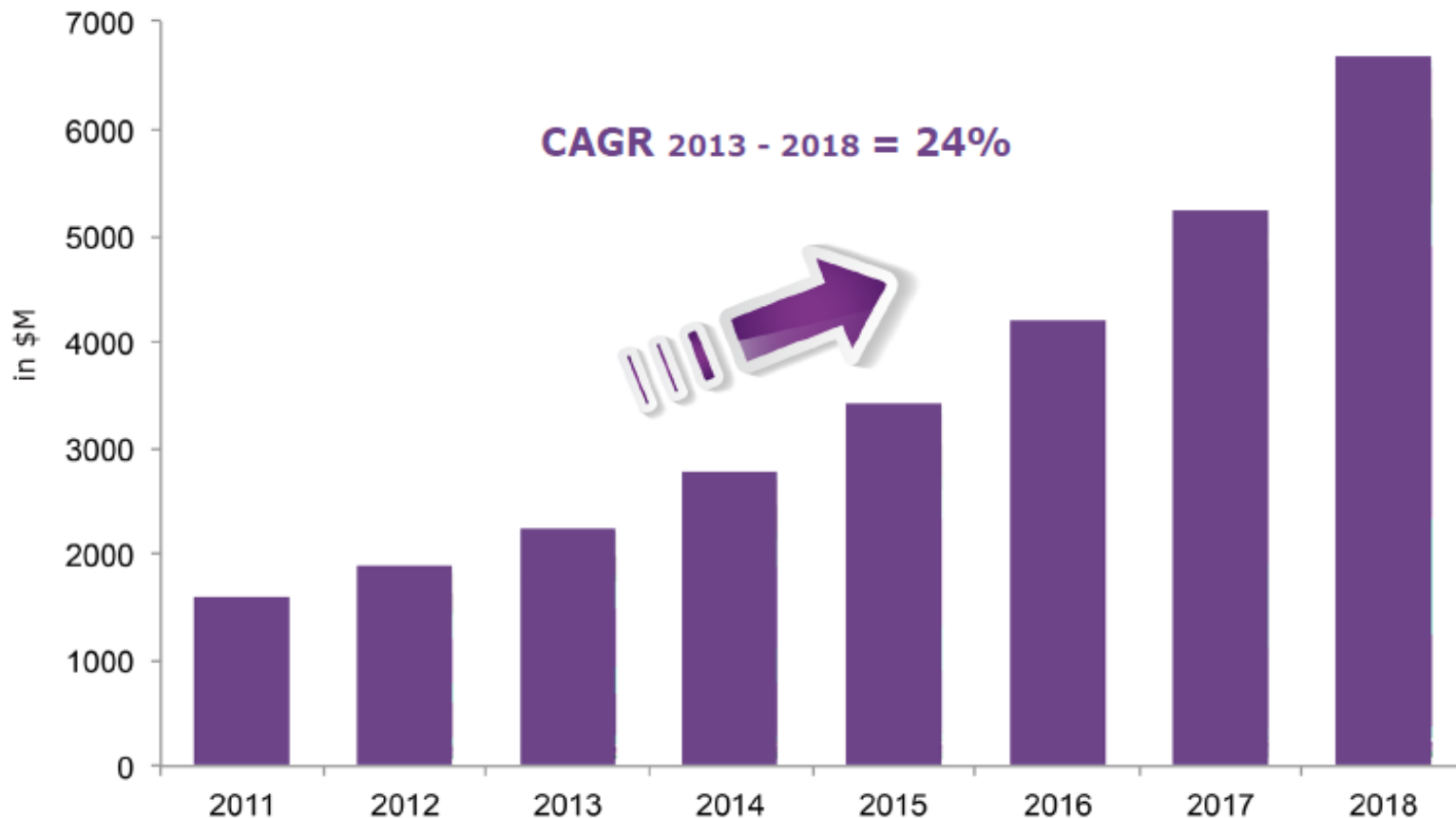
# 2016 TOP30 MEMS PLAYERS RANKING





# КАК СЕ ПОЯВЯВАТ И ДОКЪДЕ СТИГАТ МЕМС?

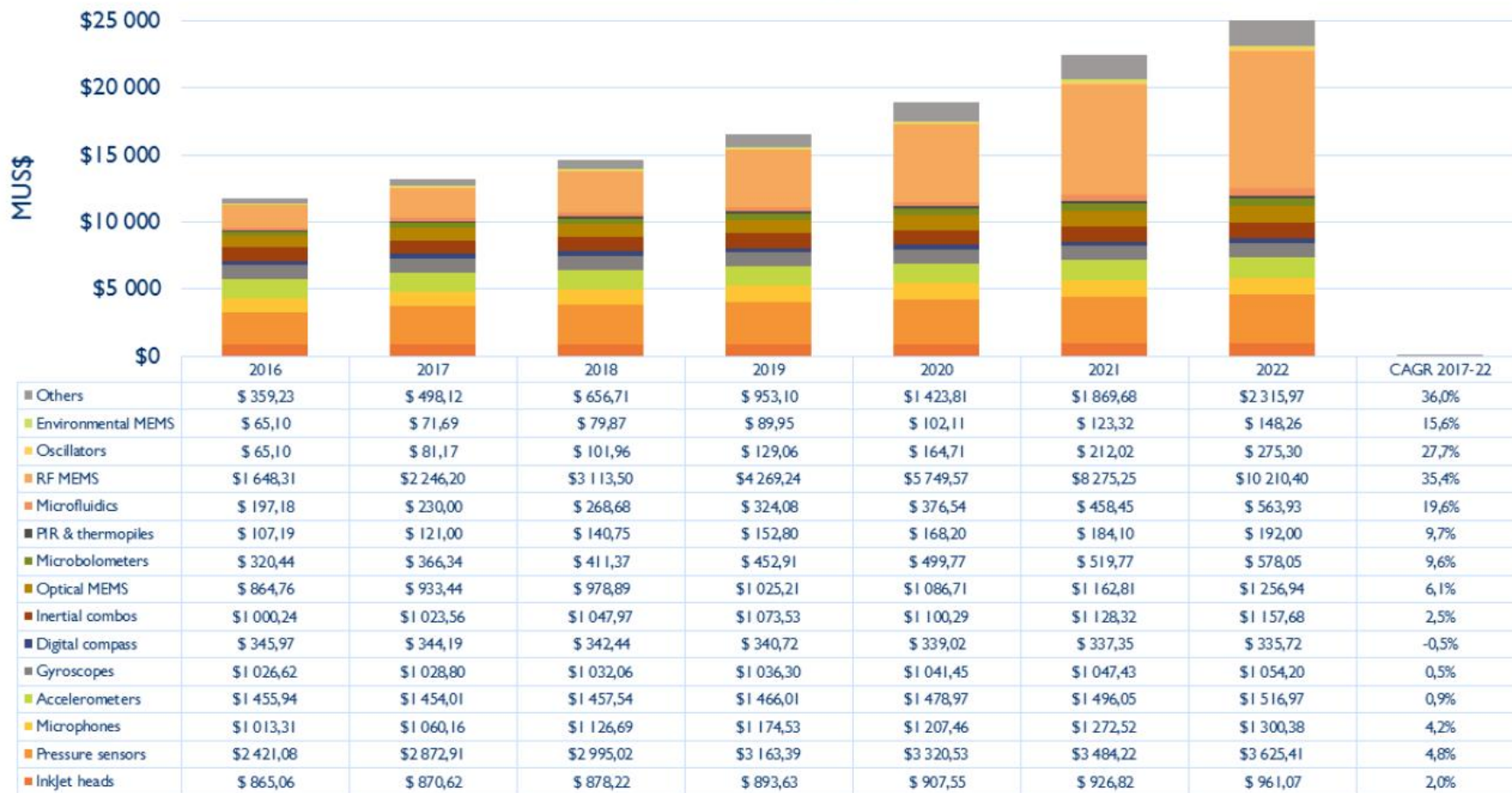
Пазар на БиоМЕМС и микросистеми за бита в \$М



20.10.2017 г.

# MEMS MARKET 2016-2022 IN \$ BY DEVICES

**MEMS \$M forecast per device**  
©2017 Yole Développement







# МЕМС В ИНДУСТРИАЛНИТЕ РЕВОЛЮЦИИ

20.10.2017г

## ПЪРВА ИНДУСТРИАЛНА РЕВОЛЮЦИЯ

- 1765г. Парна машина на Watt
- 1775 Металорежещи машини (пробивна машина на Wilkinson)
- 1797 Производство на взаимозаменяеми Части (Whitney)
- Поява на фабриките
- ~ 1800 Железопътните линии

## ВТОРА ИНДУСТРИАЛНА РЕВОЛЮЦИЯ

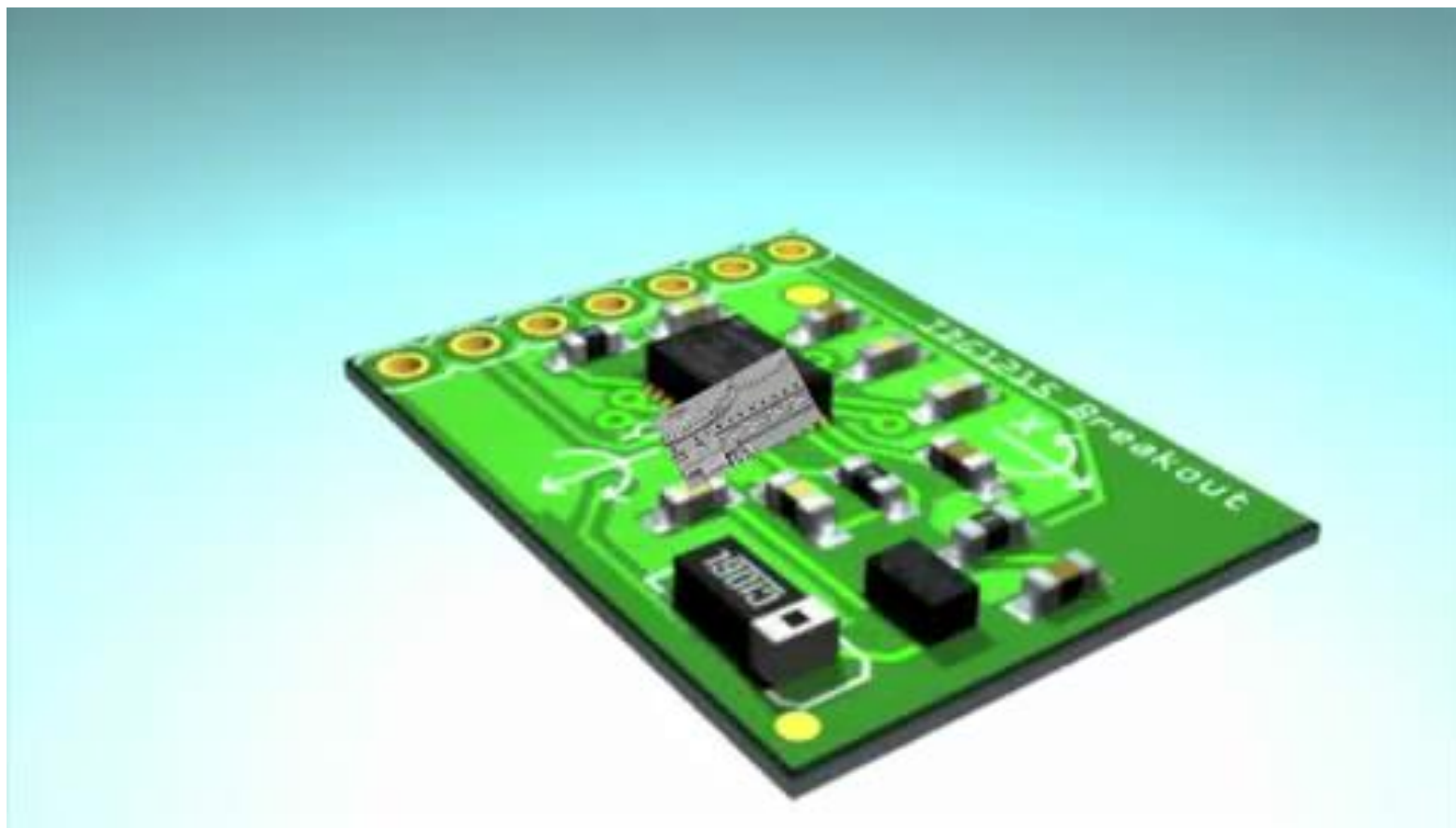
- 1881г. Електрификация (започва 1881, а замества парната тяга 1920 г.)
- 1990 Заваряване
- 1913 Поточните линии (Henry Ford)
- Научно базирано управление на материалите и частите
- 1940 Начало на масовото производство

## НОВА ИНДУСТРИАЛНА РЕВОЛЮЦИЯ В МИНИАТЮРИЗАЦИЯТА

- 1947 г. Откриване на транзистора
- 1955 г. ИС
- 1971 Intel μ процесор
- 1980 г. Индустиални работи
- 1982 г. МСТ (МЕМС 1992 г.)**
- 1983 г. Интернет
- 2000 г.
- Миниатюризация чрез нано технологии



## АРХИТЕКТУРА НА МЕМС



20.10.2017 г. [5]

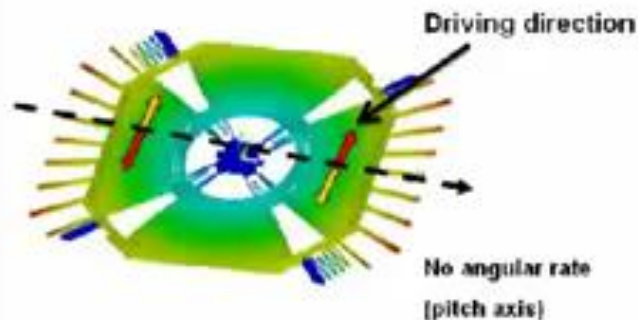


# АРХИТЕКТУРА НА МЕМС

## MEMS gyroscopes sense and drive

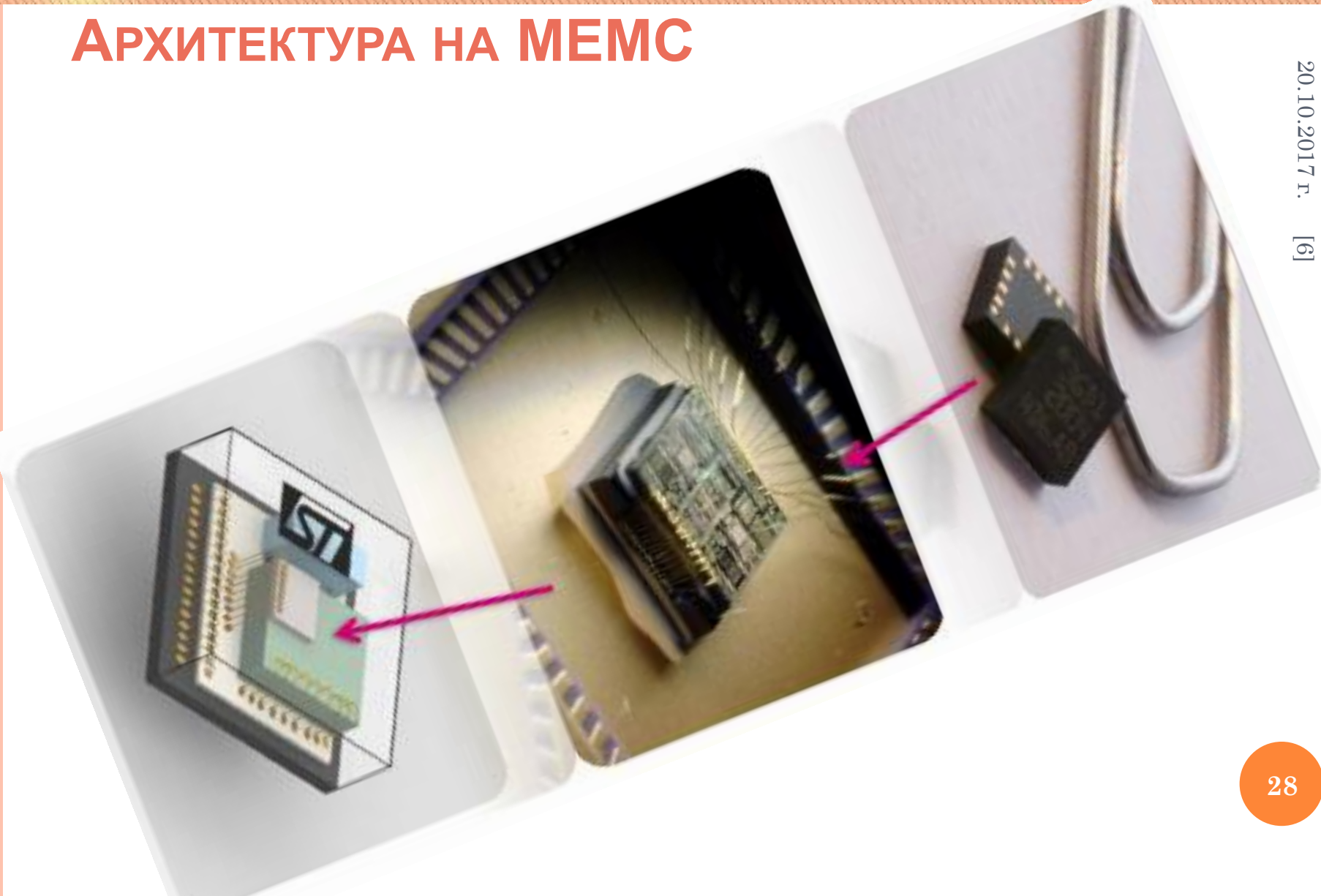


In a MEMS gyroscope, the masses are kept moving (oscillating) by means of electrostatic actuation on capacitive driving plates (drive circuitry). As soon as an external angular rate is applied, the capacitive sensing interface reads the corresponding displacement of the masses caused by the Coriolis effect.





# АРХИТЕКТУРА НА МЕМС

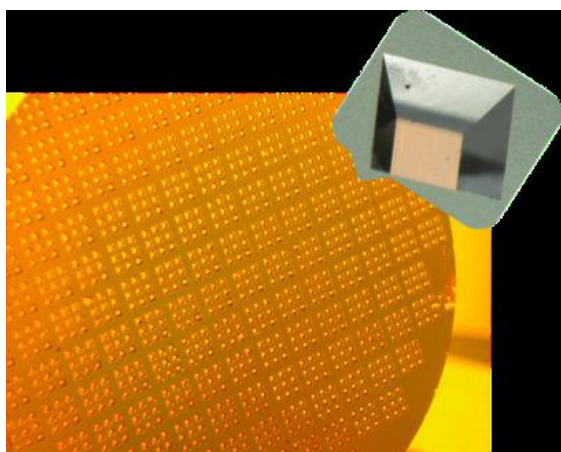


20.10.2017 г. [6]

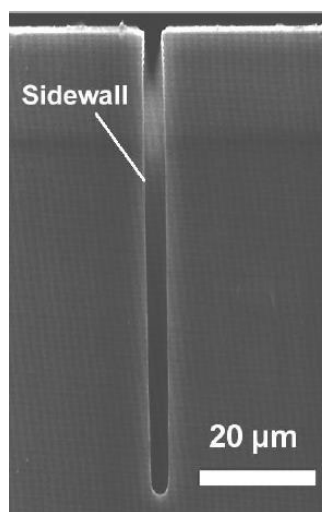


## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

### ○ Революционни решения в технологията



**Обемно ецване** – създават се дълбоки кухини в силиция и се премахват помощни слоеве.



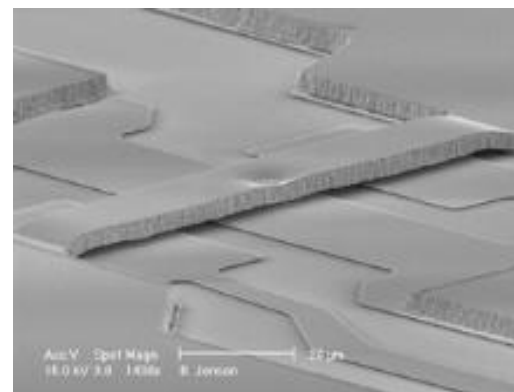
#### **Deep Reactive Ion Etching (RIE)**

Чрез плазмено ецване се създават дълбоки отвори в тънки слоеве [SEM images of Khalil Najafi, University of Michigan]

#### **Повърхностна микромашинна технология**



**LIGA – Lithographie, Galvanoformung, Abformung**  
Литография, електролиза и електроформиране за да създаде микро размерни модели и компоненти. [Sandia National Labs]





## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни свойства на материалите

### Кристалният силиций Si – идеален, основен материал в МЕМС

1. **Механично стабилен** и лесно **се интегрира** с електрониката върху една и съща основа, защото е и **полупроводников материал**.
2. Електрониката за преобразуване на сигналите, например чрез **p** или **n** тип **пиезорезистори** може лесно да се **интегрира с транзистори върху същата подложка**.
3. Силицият има **надлъжен модул E [Pa]**, близък по стойност на този на **стоманта**, но е **лек като алуминий** (плътност 2.3 kg/m<sup>3</sup>).



## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

### ○ Революционни свойства на материалите

4. Силицият има точка на топене  $1400^{\circ}\text{C}$ , което е около 2 пъти по-висока от тази на алуминия. Тази висока точка на топене прави силиция **стабилен по отношение на размерите** даже при високи температури.

5. Неговият **коэффициент на температурно разширение е около 8 пъти по-малък от този на стоманата и 10 пъти по-малък от този на алуминия.**

6. При силиция **практически няма механичен хистерезис**, което го прави идеален материал за сензори и актуатори.

7. Силициевите пластини са **висок клас на грапавост и равниност**, което прави възможно нансянето на покрития, тънки слоеве и да интегрира структурни части с прецизни електромеханични функции.



## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

### ○ Революционни свойства на материалите

	$\sigma_y$ ( $10^9 \text{ N/m}^2$ )	E ( $10^{11} \text{ N/m}^2$ )	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	C ( $\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$ )	k ( $\text{W/cm}\cdot^\circ\text{C}$ )	$\alpha$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	$T_M$ ( $^\circ\text{C}$ )
Si	7.00	1.90	2.30	0.70	1.57	2.33	1400
SiC	21.00	7.00	3.20	0.67	3.50	3.30	2300
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	14.00	3.85	3.10	0.69	0.19	0.80	1930
SiO <sub>2</sub>	8.40	0.73	2.27	1.00	0.014	0.50	1700
Aluminum	0.17	0.70	2.70	0.942	2.36	25	660
Stainless Steel	2.10	2.00	7.90	0.47	0.329	17.30	1500
Copper	0.07	0.11	8.9	0.386	3.93	16.56	1080
GaAs	2.70	0.75	5.30	0.35	0.50	6.86	1238
Ge		1.03	5.32	0.31	0.60	5.80	937
Quartz	0.5-0.7	0.76-0.97	2.66	0.82-1.20	0.067-0.12	7.10	1710

$\sigma_y$  – напрежение на пропорционалност; E - модул на Young;  
 $\rho$  - плътност; C - специфична топлина; k – термична кондуктивност;  
 $\alpha$  – коефициент на температурно удължение,  $T_M$  – температура на топене.

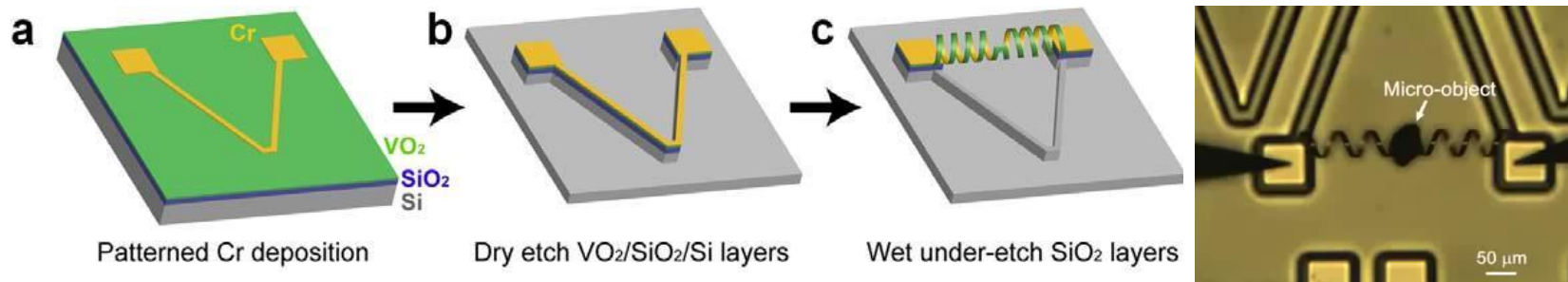




# МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни свойства на материалите  
Сплави с памет на формата

Материал	$\epsilon$	W/V [J/m <sup>3</sup> ]	Внедрител	Година
NiTinol	8%	$2,5 \cdot 10^7$	Naval Ordnance Laboratory	1962
BiFeO <sub>3</sub>	14%	$5 \cdot 10^7$	Berkeley Lab's Materials Sciences Division	2013
VO <sub>2</sub>	>50% ?	39 kW/kg	Lawrence Berkeley National Laboratory	2013





## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

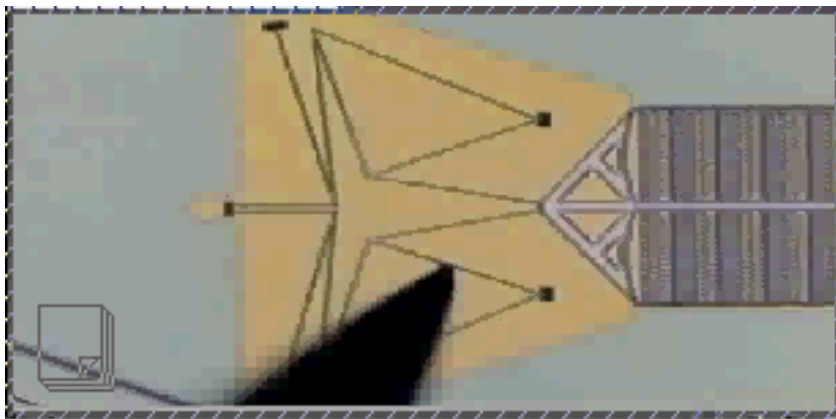
- Революционни свойства на материалите

Електро реологични флуиди  
Магнито реологични флуиди  
Пиезоелектрични материали  
Електроактивни полимери  
Карбонови нано тръби  
Метаматериали  
Графени

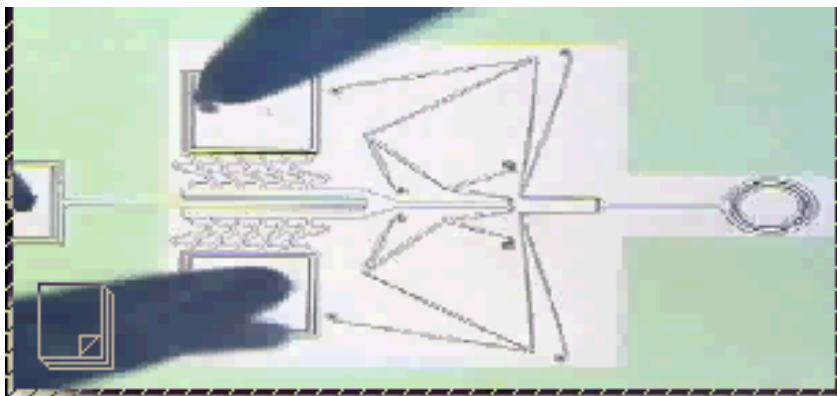


## МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни решения в структурите и механизмите



Еквивалентна  
структура на 10  
звенен  
симетричен  
механизъм!



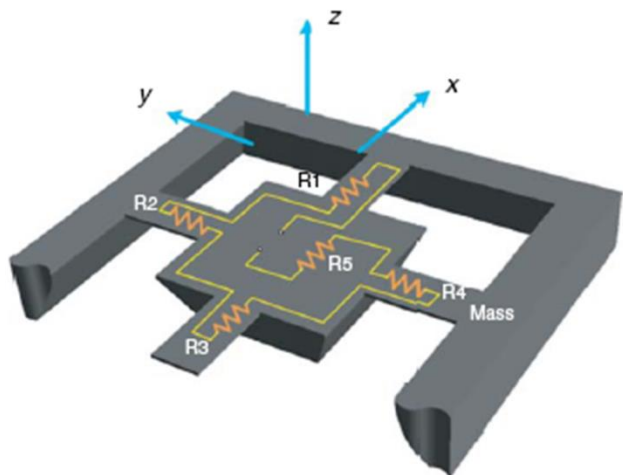
Еквивалентна  
структура на 20  
звенен  
симетричен  
механизъм!



# МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни решения в структурите и механизмите

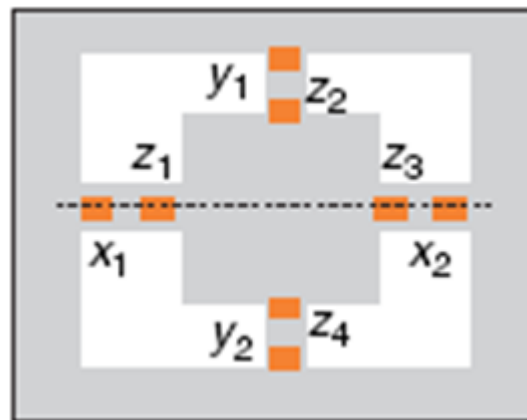
20.10.2017 г.



18 пъти  
статично  
неопределими  
пространствени  
неподвижни  
структури!

Три-осов пиезореистивен  
акселерометър

При ускорение по ос  $x$ ,  $R1$  и  $R3$  променят стойностите си противоположно, докато  $R2$  и  $R4$  се изменят с еднакви стойности и знак. Така ускорението по ос  $x$  може да бъде установено чрез разликата на  $R1$  и  $R3$ . ( $R5$ ) се използва за елиминирание на термичните отклонения. Сумата от всички четири пиезореистори дава ускорението по ос  $z$ .



Три-осов пиезоелектричен  
акселерометър

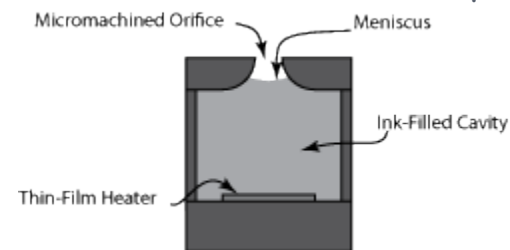
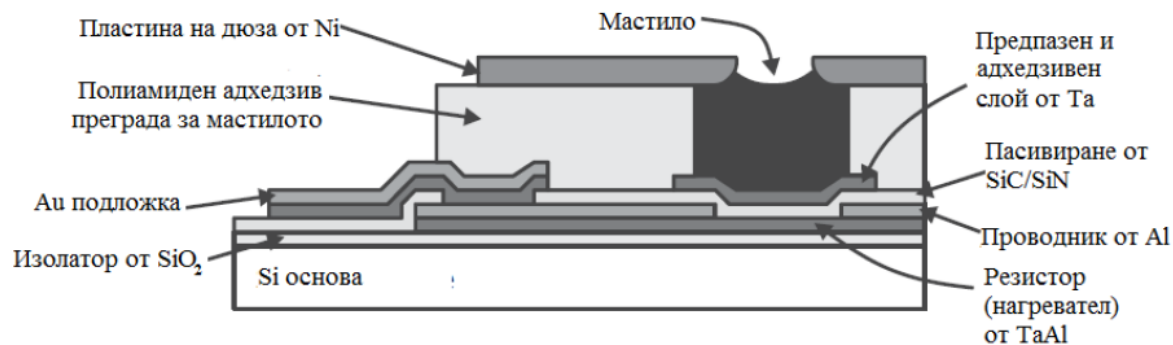
При ускорение по ос  $z$ , инерционната маса опъва горните слоеве на биморфните греди (т.е.,  $x1$ ,  $x2$ ,  $y1$ , и  $y2$ ), и натискат  $z1$ - $z4$ . Така **сумата от  $z1$  до  $z4$  измерва ускорение по  $z$** . Диференциалните компоненти  $x1$ ,  $x2$  и  $y1$ ,  $y2$  са нули. Когато има ускорение по  $x$  инерционната маса се завърта около  $y$ , опъва  $x1$  и  $x3$  и натиска  $z1$  и  $x2$ . Осен това предизвиква сръзваци напрежения в  $y1$ ,  $y2$ ,  $z2$ , и  $z4$ , се пренебрегват. Така **ускорението по  $x$  предизвиква сигнал от разликата на  $x1$  и  $x2$** . разликите от  $y1$  и  $y2$  и сумите от  $z1$  до  $z4$  са нула защото напреженията в  $y1$  и  $y2$  имат еднакви амплитуди и знак, а  $z1$  и  $z3$  имат еднакви амплитуди, но противоположни знаци. За ос  $y$  се прилага същият принцип [8].



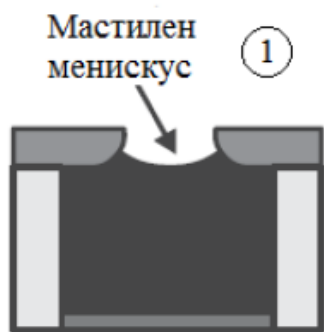
# МЕМС - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни решения в принципа на действие

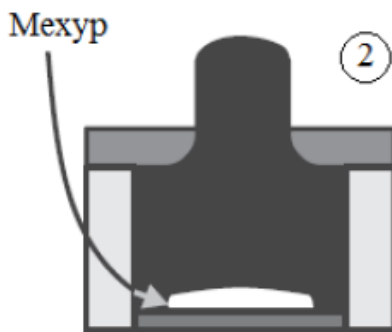
20.10.2017 г.



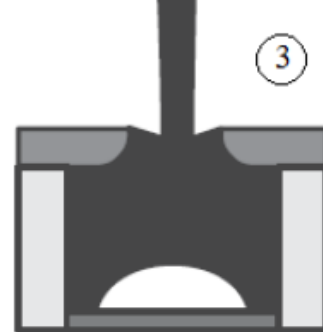
Състояние 1 се повтаря след около 50  $\mu$ s. Честотата на циклите е 20 kHz.



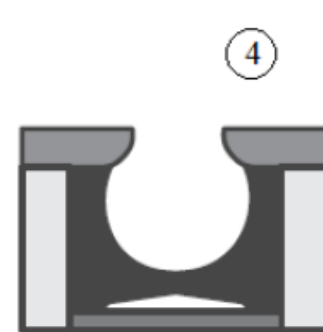
При 0 s стартиране на цикъла



След 5  $\mu$ s мехурът се оформя



След 15  $\mu$ s капката се изхвърля



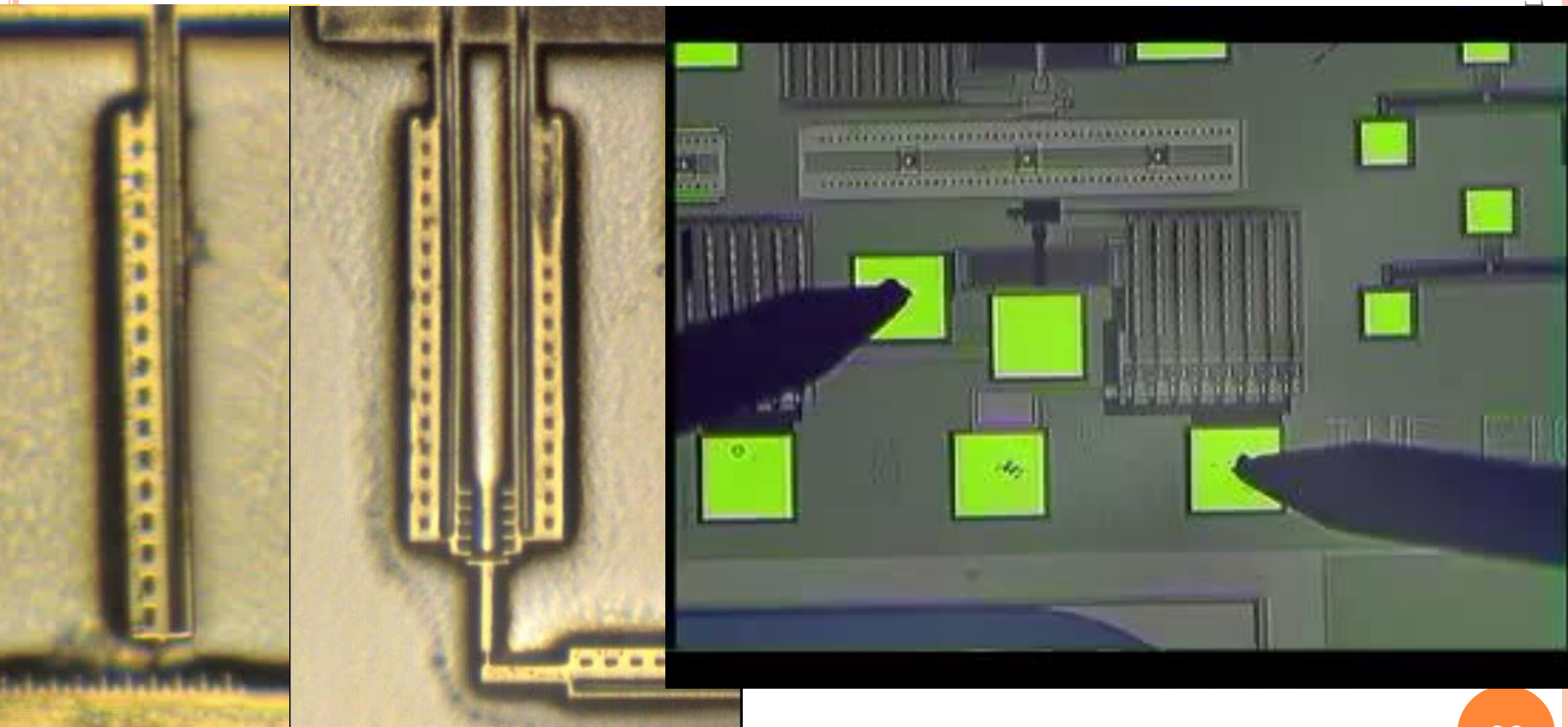
След 24  $\mu$ s мехурът се разрушава, а менискуът се свива



## MEMS - НИЗ ОТ РЕВОЛЮЦИОННИ РЕШЕНИЯ

- Революционни решения в принципа на действие

20.10.201

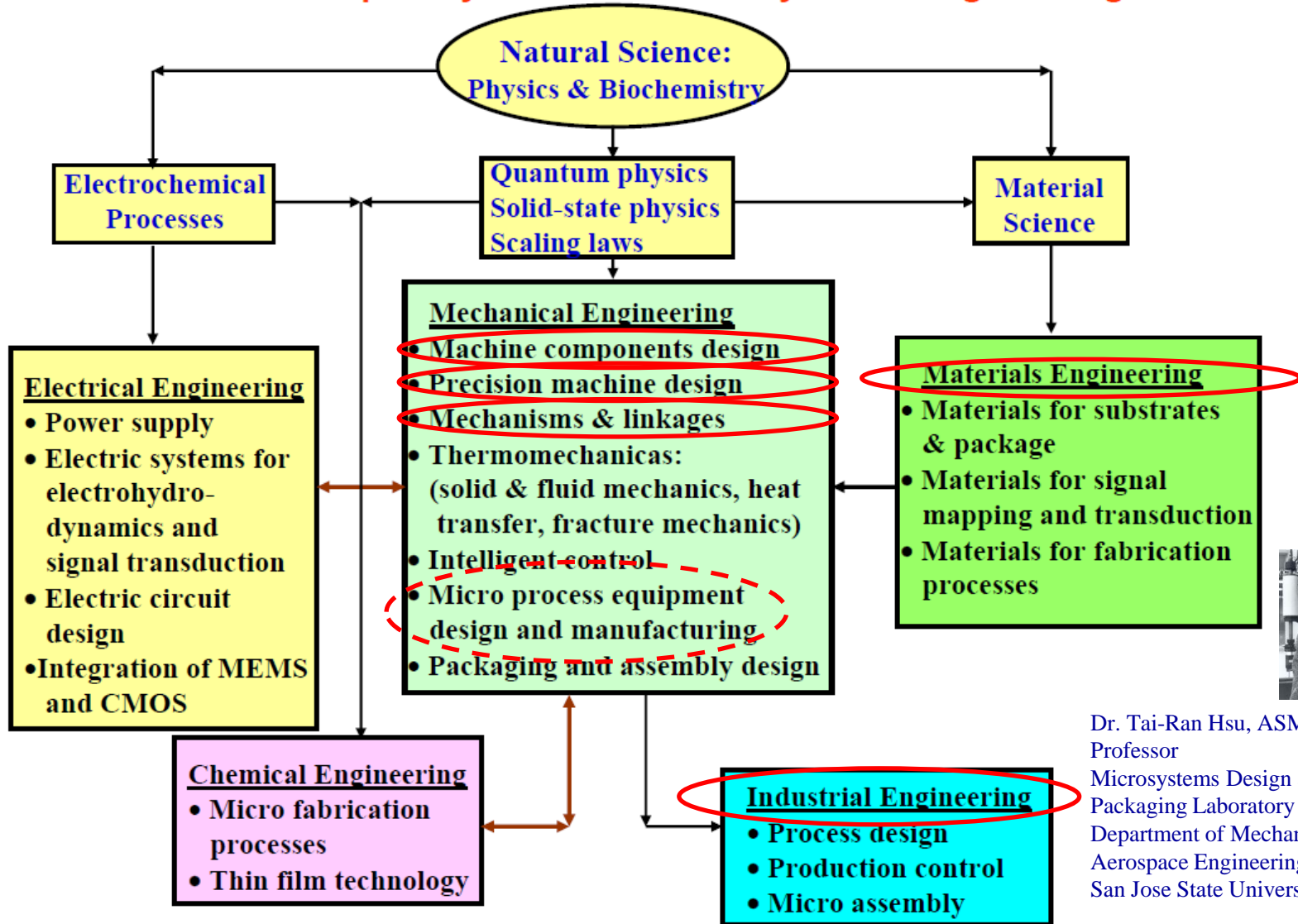


Микро термоактуатори U и V образен тип [10]



# ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРЕН И МУЛТИДИСЦИПЛИНАРЕН ХАРАКТЕР НА МЕМС The Multi-disciplinary Nature of Microsystems Engineering

20.10.2017 г.



Dr. Tai-Ran Hsu, ASME  
 Professor  
 Microsystems Design and Packaging Laboratory  
 Department of Mechanical and Aerospace Engineering  
 San Jose State University [11]



## ОТЛИЧИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Предимства пред макро устройствата

Интерирани  
технологии

- Интегрирани многочислени функции

Серийно  
производство

- Намаляване на цената
- Съкращаване на времето за производство

Точност и  
повтаряемост  
на размерите

- Подобряване на качеството на работа
- Многозвенни еластични механизми

Миниатюри-  
зация

- Ниска консумация на енергия
- Намалено вредно действие върху околната среда
- Висока надеждност
- Повишено бързодействие
- Преносимост





## ОТЛИЧИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

21

Микроелектроника	Микросистеми (силициеви) [11]
Предимно <b>2D</b> структури	Сложни <b>3D</b> структури
Неподвижни структури	Обикновено има <b>подвижни компоненти</b>
Преобразува електричество за <b>специфични електрически функции</b>	Изпълнява <b>голямо разнообразие от</b> специфични биологични, химични, електромеханични и оптични <b>функции</b>
ИС са <b>изолирани от околната среда</b>	Специфични компоненти са <i>свързани с околната среда</i>
<b>Материалите</b> са кристален Si, силициеви съединения, керамики и пластмаси	Кристален Si, GaAs, и други подобни материали, кварц, полимери, керамики и метали
<b>Отработени методологии за проектиране</b> на ИС	<b>Липса на методологии</b> за инженерно проектиране и стандарти
<b>Голям брой от</b>	<b>По-малко електрически</b>



## ОТЛИЧИТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

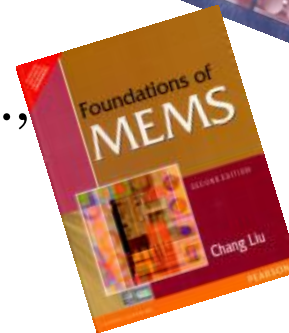
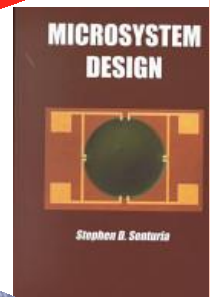
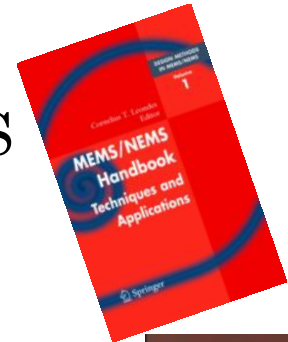
21

Микроелектроника	Микросистеми (силициеви) [11]
Налични са <b>индустриални стандарти</b>	<b>Няма индустриални стандарти</b> в проектирането, избора на материала, производствения процес и корпусите
<b>Масово производство</b>	<b>Серийно или дребносерийно</b> според нуждите на клиента
<b>Производствените процеси са изпитани</b> и надлежно <b>документирани</b>	Използват се много микропроизводствени процеси, но без стандартни процедури, различни микрообработки
<b>Изграждането на корпусите</b> е относително <b>добре установено</b>	Изграждането на корпусите е в <b>начален стадии</b>
Предимно се базират на <b>инженерните области електричество и химия</b>	Отнасят се към <b>всички дисциплини на науката и инженерството</b>



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Cornelius T. Leondes**, (editor), MEMS/NEMS Handbook Techniques and Applications, Vol. 1 Design Methods, Springer, 2006.
2. **Stephen D. Senturia**, Microsystem design, Kluwer Academic Publishers, 2001, (*Massachusetts Institute of Technology*).
3. **Tai-Ran Hsu**, Lectures on MEMS and microsystems design, Department of Mechanical and Aerospace Engineering San Jose State University.
4. **Chang Liu**, Foundations of MEMS, 2nd ed., Prentice Hall, **2012**.



20.10.2017 г.



## ЛИТЕРАТУРА

5. Kubasgian Y., Leung G., Stewart D., Micro Electro Mechanical Systems, <http://youtu.be/j8VFv1DySHU>, 27.12.2013 г.
6. STMicroelectronics, MEMS gyroscopes - A revolutionary way to interface with the real world (ePresentation): <http://youtu.be/A03AENwOVNY>, 27.12.2013 г.
7. Mounier E., Robin L., MEMS Markets Status of the MEMS Industry report, 2013, Yole Développement, 2013.
8. Gianchandani Y. B., Tabata O., Zappe H P, Comprehensive microsystems, Vol. 2, Elsevier, 2008, pp. 69-100.





## ЛИТЕРАТУРА

9. **Askeland, R. A., W. D. Childers, and W. R. Sperry,** The Second-Generation Thermal Ink-Jet Structure, *Hewlett-Packard Journal*, Vol. 39, No. 4, August 1988, pp. 28–31.
10. **Baker, M.S., Plass, R.A., Headley, T.J. Walraven, J.A.,** Final Report: Compliant Thermo-Mechanical MEMS Actuators LDRD #52553, *Sandia Report SAND2004-6635*, 2004.
11. **Tai-Ran Hsu,** Lectures on MEMS and microsystems design and manufacture, 2006.
12. **Tai-Ran Hsu,** Micromechatronics - the core technology of industrial revolution in miniaturization, A plenary lecture at the International Congress on Mechatronics, San Luis Potosi, Mexico, on March 4, 2005.



**Благодаря за  
вниманието!**