



2.0 ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ, КЛАСИФИКАЦИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИНЦИПИ НА ПРЕОБРАЗУВАНЕ В МИКРОСИСТЕМИТЕ

Проф. д-р Тодор Тодоров

tst@tu-sofia.bg



Съдържание

- **Класификация**
- **Функционални връзки в микросистемите,**
- **Видове енергийни преобразувания,**
- **Закони за мащабиране**
- **Наносистеми**



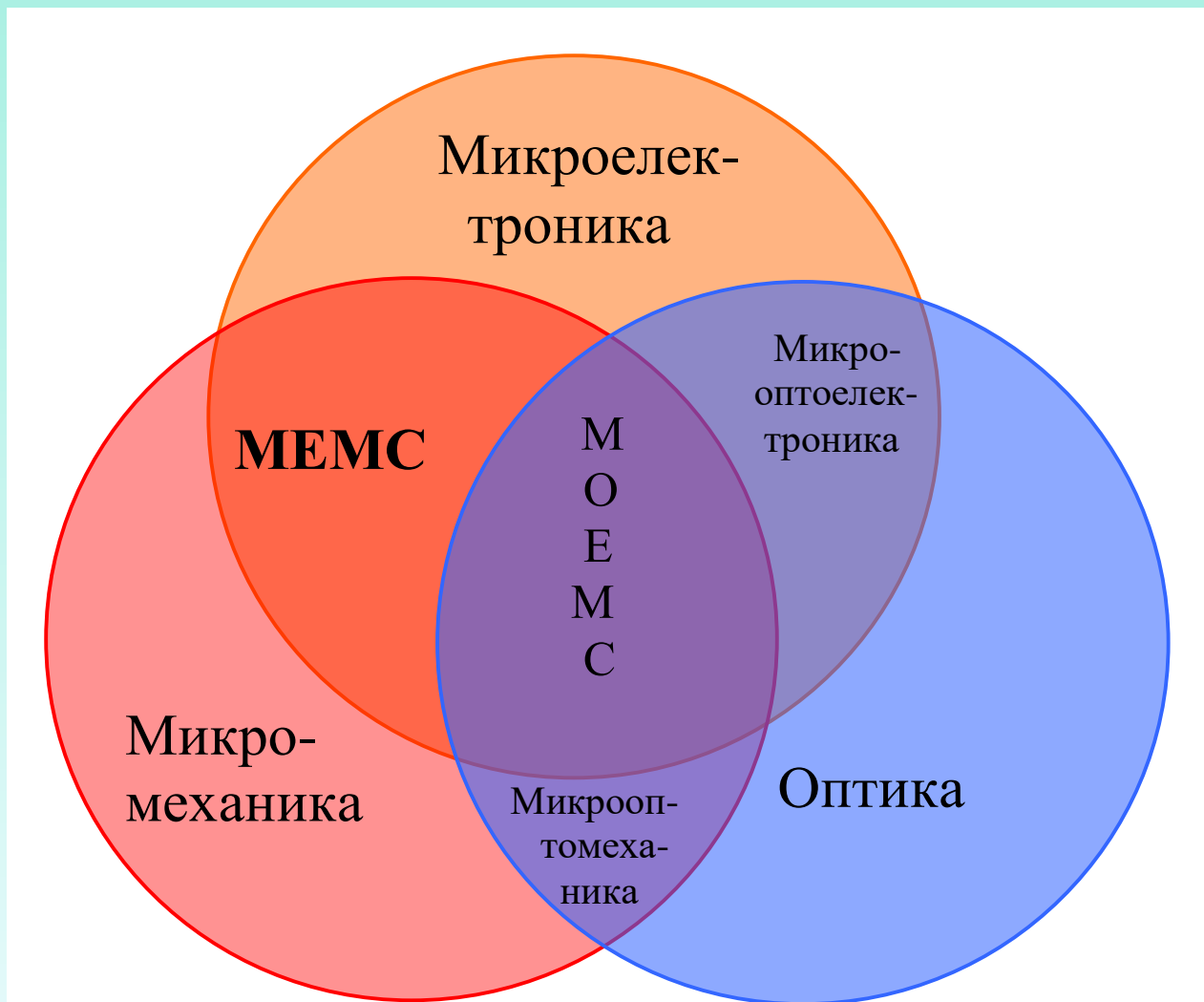
Основни понятия и дефиниции

МЕМС (МИКРОСИСТЕМА)

- високо миниатюризирани устройства или съвкупности от устройства с размери от $1 \mu\text{m}$ до 1mm ,
- обединяващи електрически и механични компоненти, като сензори, актуатори или цели завършени системи,
- произведени серийно чрез технологии за интегрални схеми (ИС).

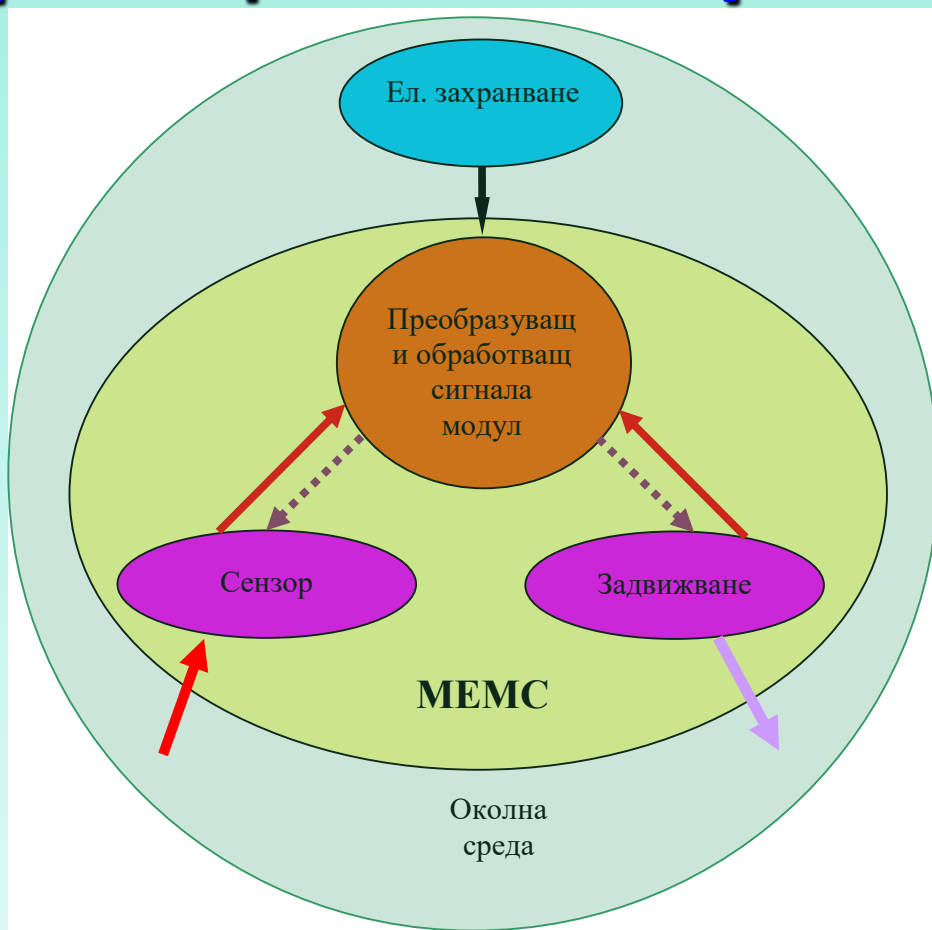


Класификация на микросистемите





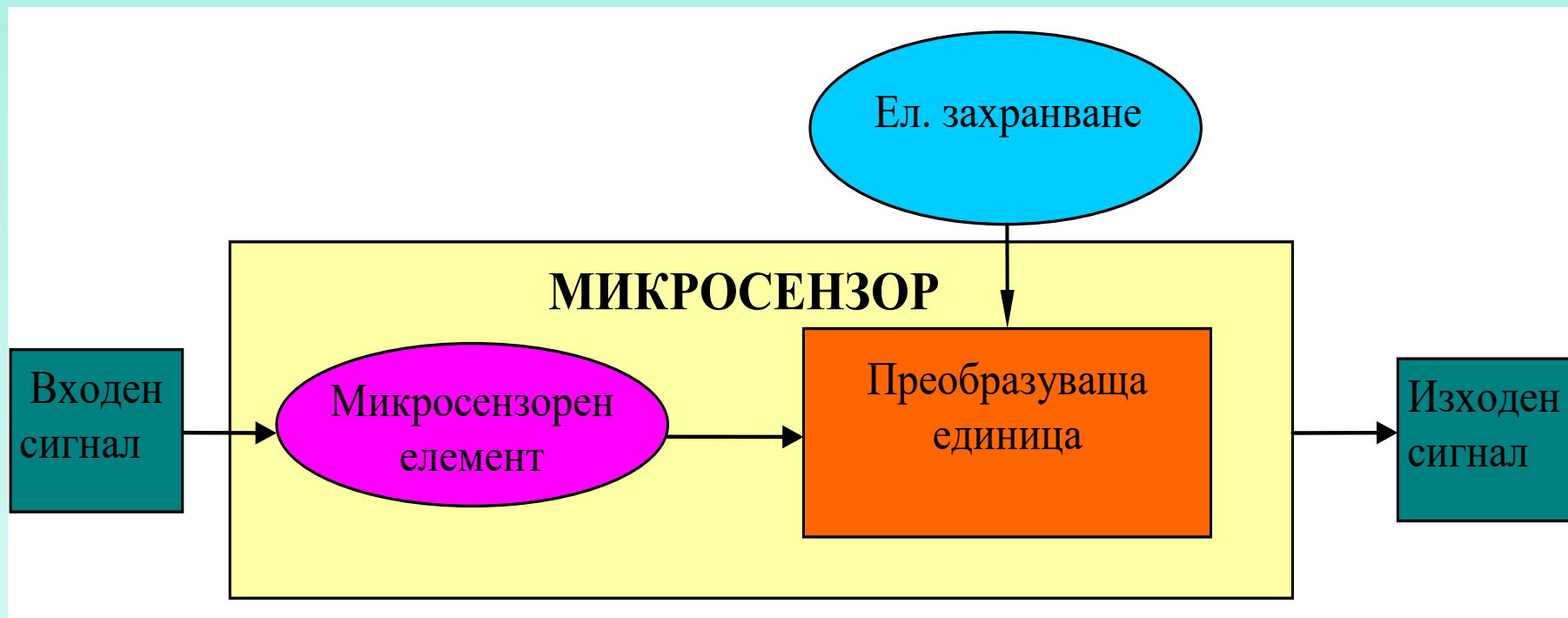
Класификация на микросистемите



Характерно за MEMC е наличието на елемент съставен от два принципни компонента:

- чувствителен и/или изпълнителен елемент,
- блок за преобразуване на сигнала. -захранване

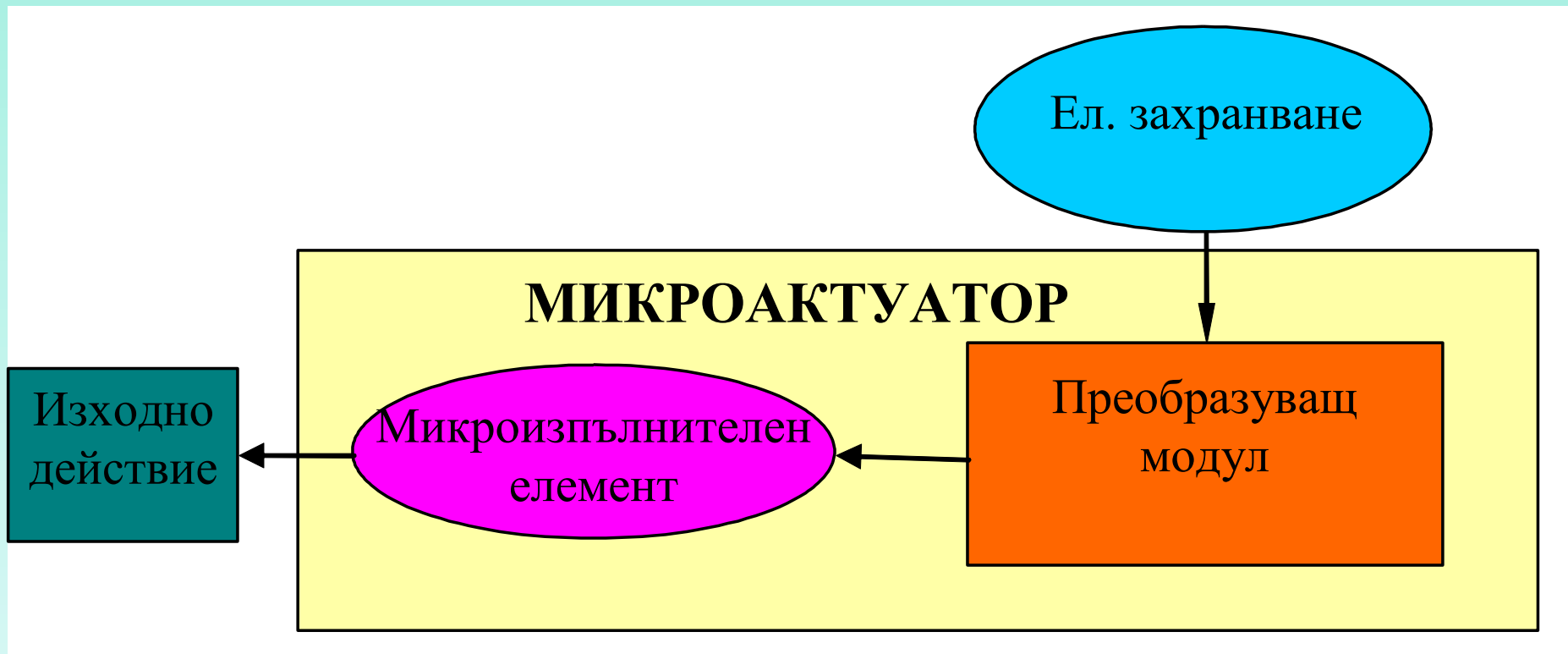
Класификация на микросистемите



Сензорът е устройство, което възприема полезна информация от обкръжаващата среда и подава една или повече величини до измервателен уред.



Класификация на микросистемите



Изпълнителното (задвижващото) устройство създава сила, която манипулира самото устройство, друго механично устройство или околната среда, за да изпълни определена полезна функция.



Класификация на микросистемите

- В зависимост от вида на входящия сигнал микросензорите се класифицират на:
 - механични;
 - електрически;
 - ТОПЛИННИ;
 - ХИМИЧНИ;
 - МАГНИТНИ;
 - ЛЪЧИСТИ .



Класификация на микросистемите

В зависимост от вида на силите, действащи на изпълнителното звено микросистемите са:

- електростатични;
- пиезоелектрични;
- магнитни;
- електромагнитни;
- топлинни.



Класификация на микросистемите

В зависимост от принципа на преобразуване на сигнала:

- **топлинни** – използва се линейното температурно разширение на материалите;
- **електростатични** – използват капацитивни сили за микрозадвижване, а промяната на капацитета е входящ сигнал за сензор;
- **електромагнитни** – взаимодействие между електромагнити, постоянни магнитни и електромагнити, ефект на Хол;
- **пиезоелектрично** – пиезоелектричните материали се поляризират електрически след деформиране, а под въздействие на електрически ток се деформират;



Класификация на микросистемите

В зависимост от принципа на преобразуване на сигнала:

- **пиезомагнитни** – генериране на магнитно поле при деформиране и обратен ефект (магнитострикция) деформиране на материал след намагнетизиране.
- **сплави с памет на формата (СПФ)** – след нагряване претърпяват структурни промени и възвръщат първоначално зададена форма.
- **двуслойно (биморфно) и многослойно (мултиморфно)** – използват се разликите в деформациите на топлинни, пиезоелектрични пиезомагнитни и СПФ и др, слоеве.
- **други видове преобразувания**- хидравлични, пневматични, течно-парно фазови промени.



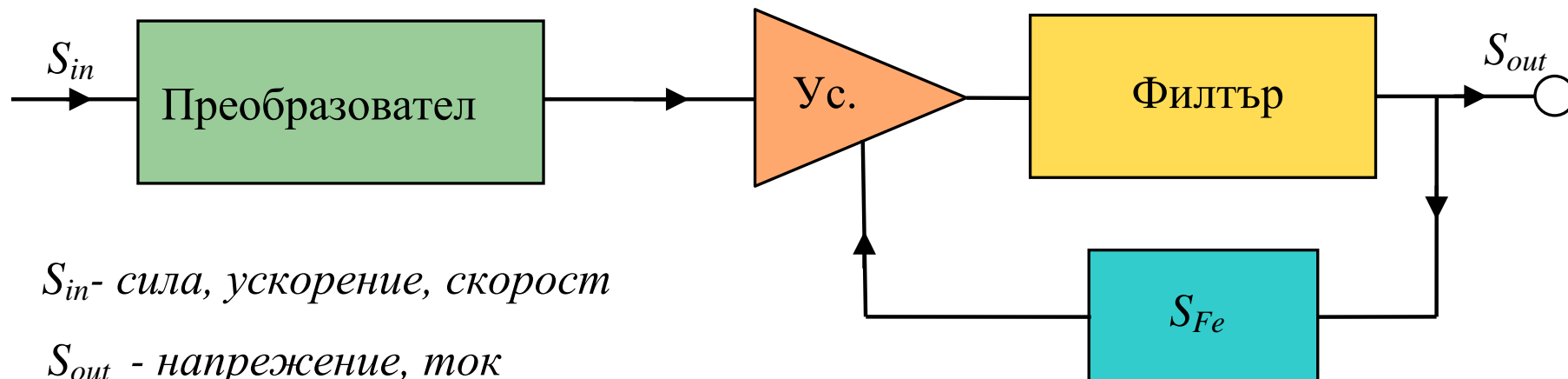
Видове енергийни преобразувания:

	Механичен	Топлинен	Електричен	Магнитен	Лъчист (Фото – Радио-)	Химичен
Механичен	Акустичен Флуиден	Фрикционен колориметър	Пиезоелектричен Пиезорезистивен	Пиезомагнитен Ефект	Фото- еластичност	
Топлинен	Топлинно удължение Биметална лента Сплави с памет на формата (СПФ)		Пироелектричен ефект Ефект на Зийбег		Лъчиста емисия	Реакция
Електричен	Пиезо- електричество	Джаулово затопляне Ефект на Пелтие	Проба на Лангмуар	Магнитна индукция	Електро- луминесценция	Електролиза
Магнитен	Магнито- стрикция Магнитни СПФ	Термо- магнитен ефект	Мангнито- резистивност Ефект на Хол			
Лъчист	Лъчисто налягане	Болометър	Фото-електричен Ефект на Дембер			Фотореакция
Химичен	Хигрометър	Калориметър Топлинна проводимост	Амперометрия Пламъчна йонизация Ефект на Волта	Ядрено- магнитен резонанс	Химическа луминесценция	



Класификация на микросистемите

В зависимост от вида на преобразувателя:



S_{in} - сила, ускорение, скорост

S_{out} - напрежение, ток

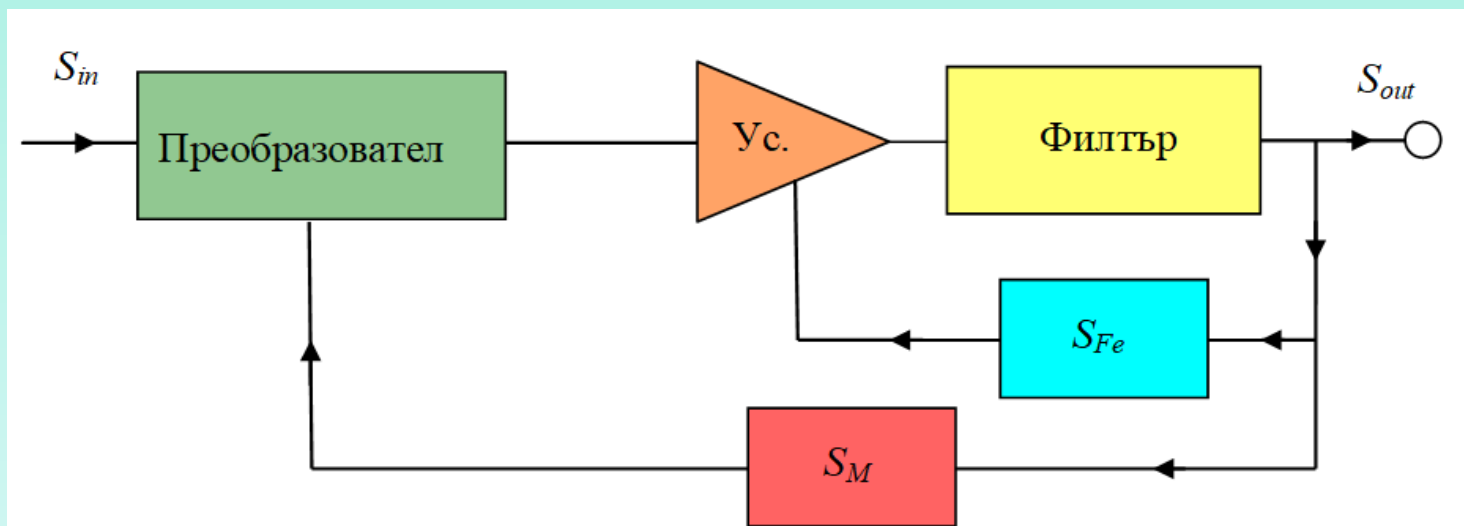
S_{Fe} - електрическа обратна връзка

MEMS с пасивни електромеханични преобразователи



Класификация на микросистемите

В зависимост от вида на преобразувателя:



S_{in} - сила, ускорение, скорост

S_{Fet} - електрическа обратна връзка

S_{out} - напрежение, ток

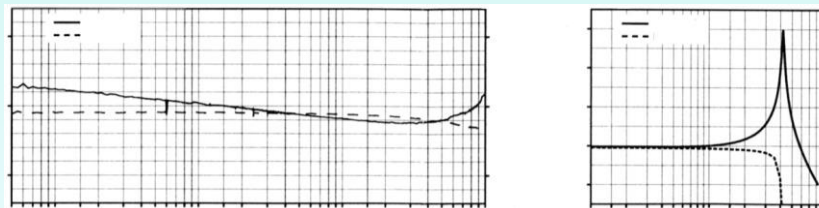
S_{Mt} - електромеханична обратна връзка

2. MEMS с активна с обратна електромеханична връзка



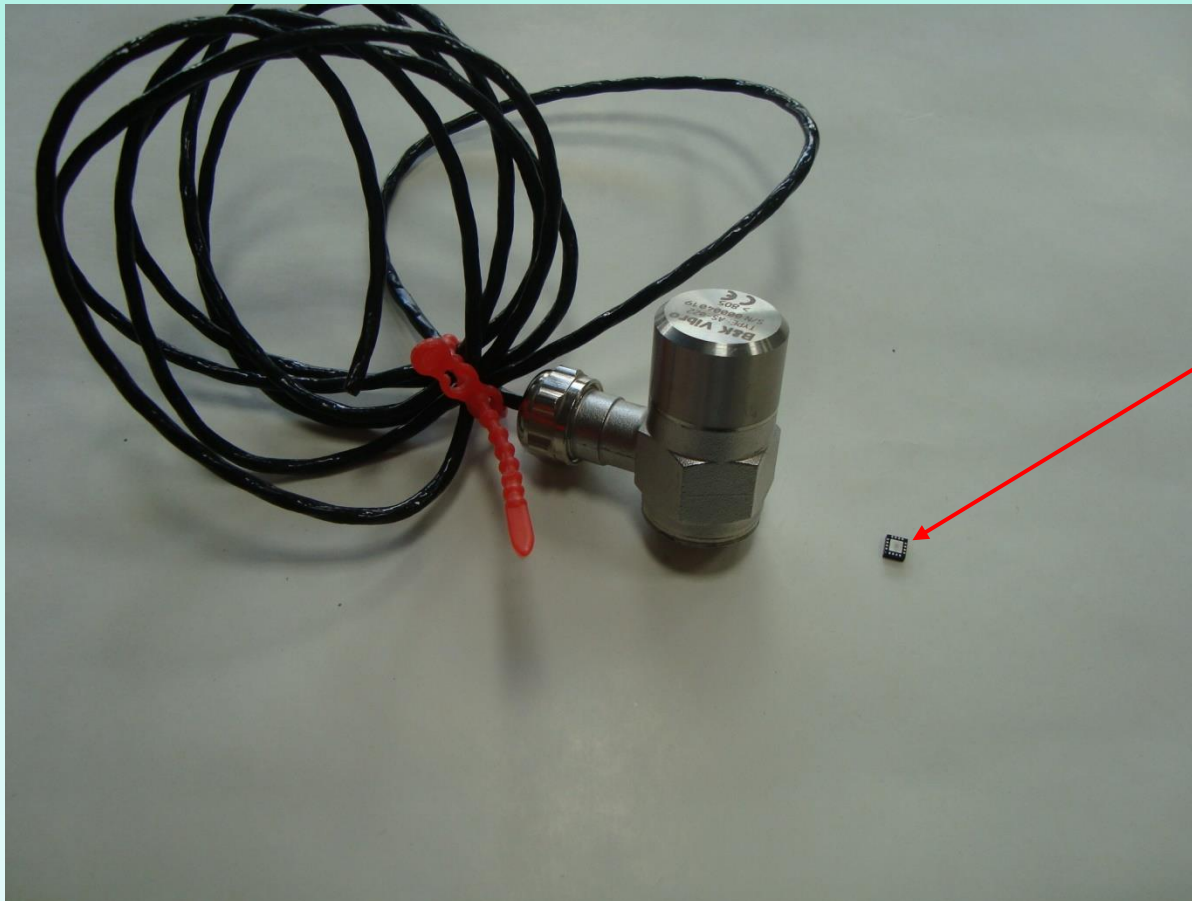
Сравнение между макро- и микросензор (акселерометър)

Характеристики	Макросистема	Микросистема
Маса	300 gr	30 mgr
Размери	Φ13,5x19,6 mm	3 × 3 × 0.9 mm
Мощност	35 W	23μA @ 3V = 70μW 0.1 μA in standby @ 3 V = 0,3 μW
Макс. ускорение	35 g	10000 g
Цена	2000 лв.	10 лв./1 бр.





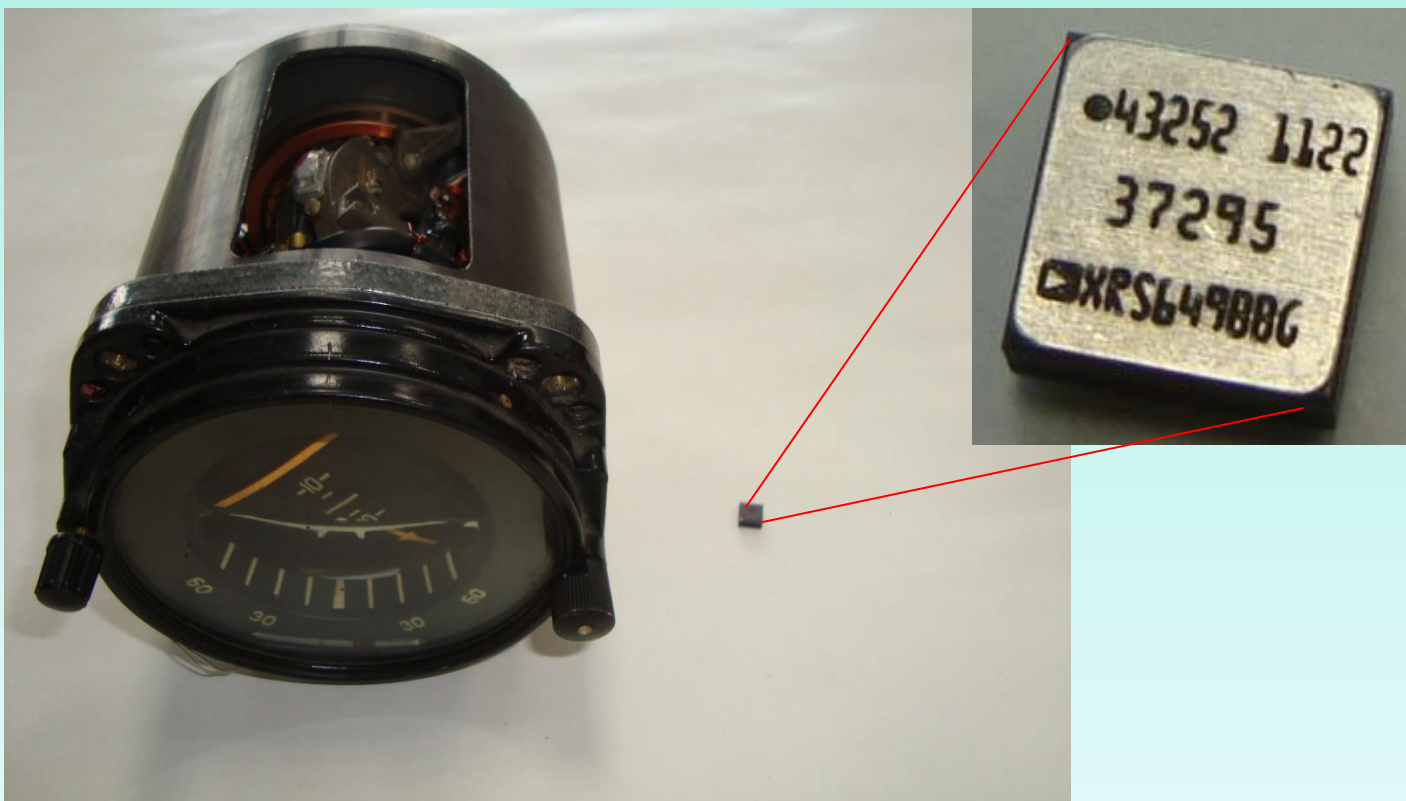
Сравнение между макро- и микросензор (акселерометър)



ADXL330



Сравнение между макро- и микросензор (жироскоп)





Закони за мащабирането

Законите за мащабирането най-общо отразяват промяната на физическите свойства на обектите взаимодействията между тях при промяна на размерите.

Ефектът от редуцията на размерите се извършва чрез изоморфно мащабиране, при което се приема, че размерите във всички посоки се променят с един и същи мащаб S . Един размер на дължина X_0 може да се мащабира до по-малък размер X_s чрез мащабен фактор S . Понеже разглеждаме мащабно редуциране следва, че $S < 1$. При тази постановка при редуциране на една дължина се получава



Закони за мащабирането

$$X_s = SX_0$$

След мащабно намаляване на размерите за площта следва

$$A_s = X_s Y_s = X_0 Y_0 S^2 = A_0 S^2$$

а за обема се получава

$$V_s = X_s Y_s Z_s = X_0 Y_0 Z_0 S^3 = V_0 S^3$$

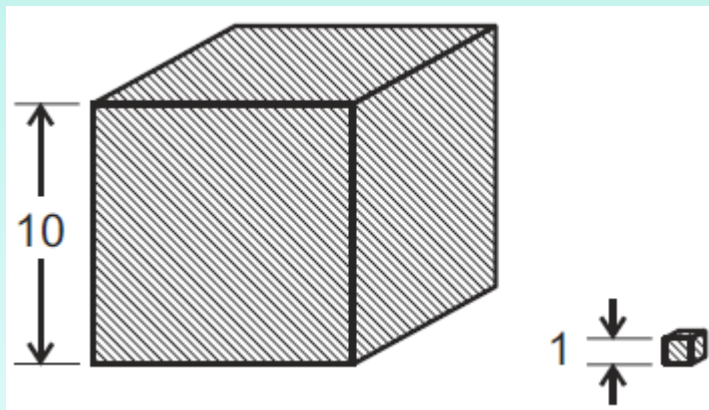
Отношението на площта към обема е важен параметър в много инженерни области, особено в динамиката на твърдото тяло, динамиката на флуидите и топлопренасянето.

$$A_s/V_s = (A_s/V_s)/S$$



Закони за мащабирането

Мащабният фактор на отношението площ/обем е S^{-1} , което означава, че с намаляване на размерите това отношение нараства. Този факт обяснява някои особености в поведението на миниатюризираните системи в сравнение с конвенционалните. Например при намаляване на размерите се увеличава влиянието на силите, зависещи от повърхността на обекта (аеродинамични, хидростатични), а силите зависещи от обема (инерционни, тегло) имат по-малко влияние.



$$V=1000$$

$$A=600$$

$$A/V=0.6$$

$$V=1$$

$$A=6$$

$$A/V=6$$

$$AVR=A/V$$

Area to
volume ratio



Мащабиране при надлъжни трептения

Двете най-важни величини, описващи механичните системи са масата m и коефициента на еластичност k .

Масата има същия мащабен фактор както обема - S^3 .

Чрез коефициента на еластичност се изразява способността на тялото да се противопоставя на деформационното действие на външни сили.

За прав прът с постоянно сечение натоварен на опън (натиск), от закона Хук и формулата за напрежението при опън натиск се извежда:

$$k = \frac{F}{\Delta l} = \frac{EA}{l} \quad \sigma = E\varepsilon \quad \sigma = F / A \quad \varepsilon = \Delta l / l$$

F – силата, с която е натоварен прът

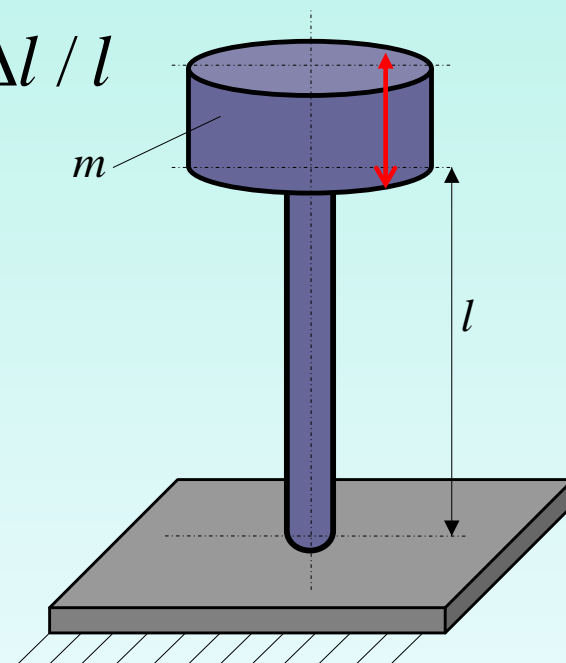
Δl – абсолютното удължение на прът

E – модул на Юнг (надлъжна еластичност)

A – напречно сечение на прът

l – дължина на прът

EA – коравина на прът при опън натиск





След заместване на мащабираните стойности на сечението и дължината за коефициента на еластичност k е получено

$$k = E \frac{S^2 A_0}{Sl_0} = S^1 k_0,$$

от където се вижда, че при редуциране на размерите надлъжната еластична константа k намалява по-бавно от масата. Собствената честота на надлъжните колебания се пресмята с формулата:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \propto \sqrt{\frac{S}{S^3}} \propto \frac{1}{S}$$

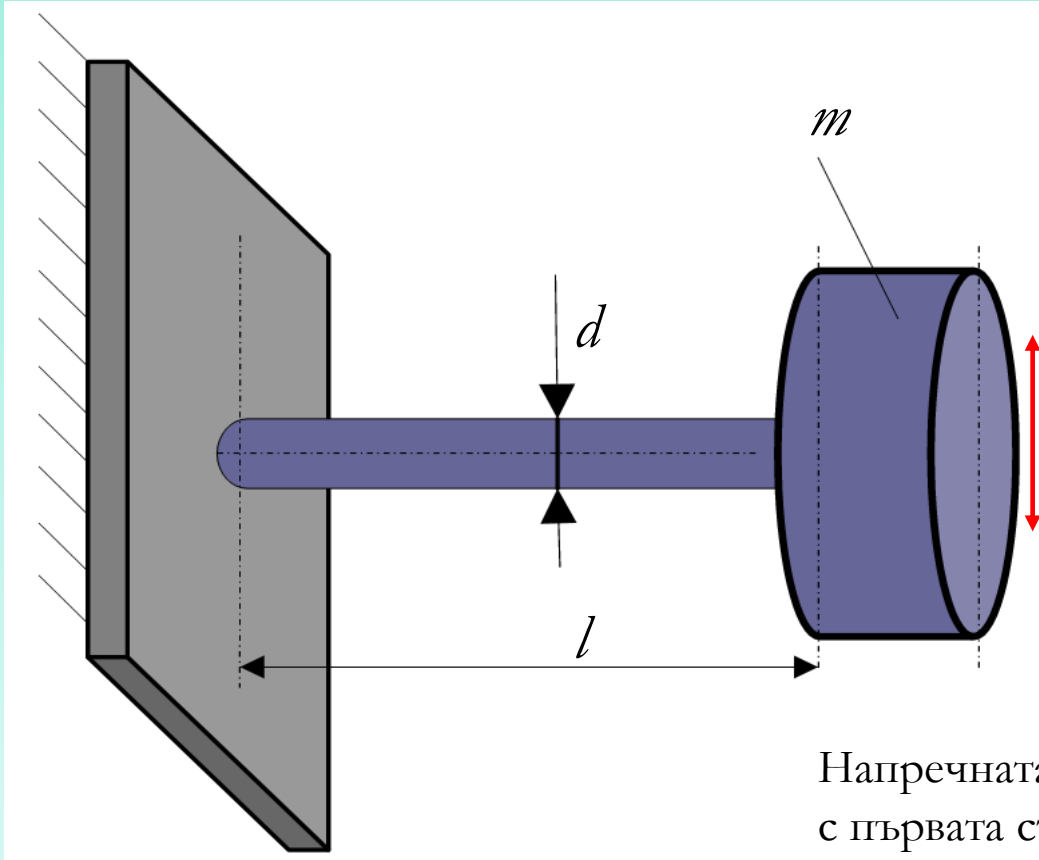
Изводи:

С редуциране на геометричните размери на пръта:

1. Еластичната константа k намалява с първата степен на мащабния коефициент S , т.е. системата омеква.
2. Честотата на надлъжните трептения f нараства пропорционално на мащабния коефициент S , или резонансната надлъжна честота се увеличава;
3. Повишава се устойчивостта на MEMS по отношение на удари, сътресения и вибрации .



Мащабиране при напречни трептения



Напречната еластична константа също намалява с първата степен на S .

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

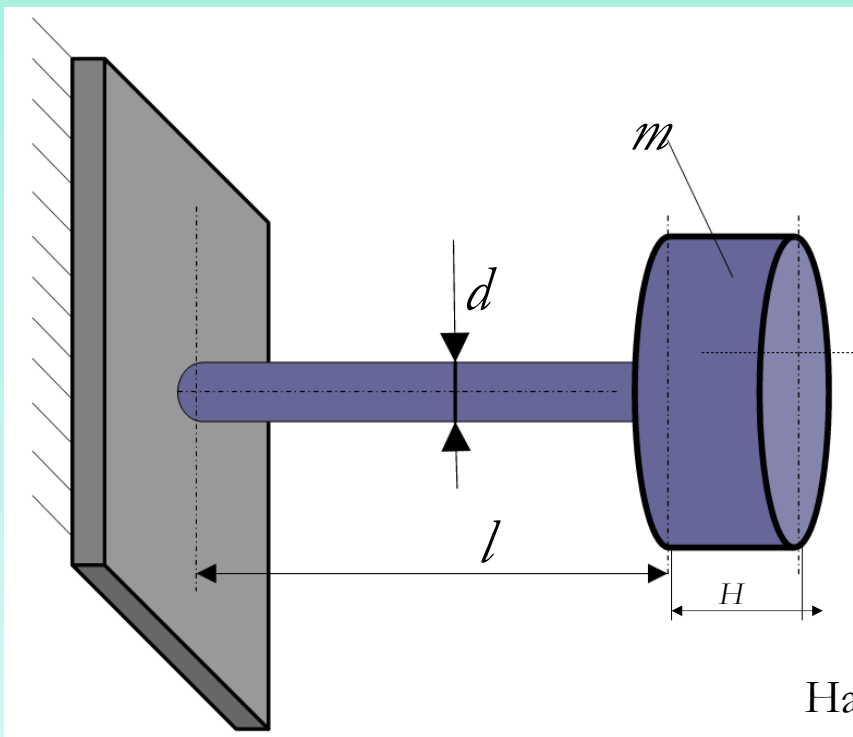
$$k_0 = \frac{3EI_0}{l_0^3}$$

$$k = \frac{3EI_0 S^4}{l_0^3 S^3} = k_0 S$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0 S}{m_0 S^3}} = f_0 \sqrt{\frac{S}{S^3}} = f_0 \frac{1}{S}$$

Напречната собствена честота се увеличава пропорционално на мащабния коефициент S .

Мащабиране при усукващи трептения



$$J\ddot{\varphi} + k_{\varphi}\varphi = 0$$

$$I_{p_0} = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$J = \frac{1}{2} \rho \pi R^4 H$$

$$k_{\varphi_0} = \frac{GI_{p_0}}{l_0} \quad [Nm / rad]$$

$$k_{\varphi} = \frac{GI_{p_0} S^4}{l_0 S} = k_{\varphi_0} S^3$$

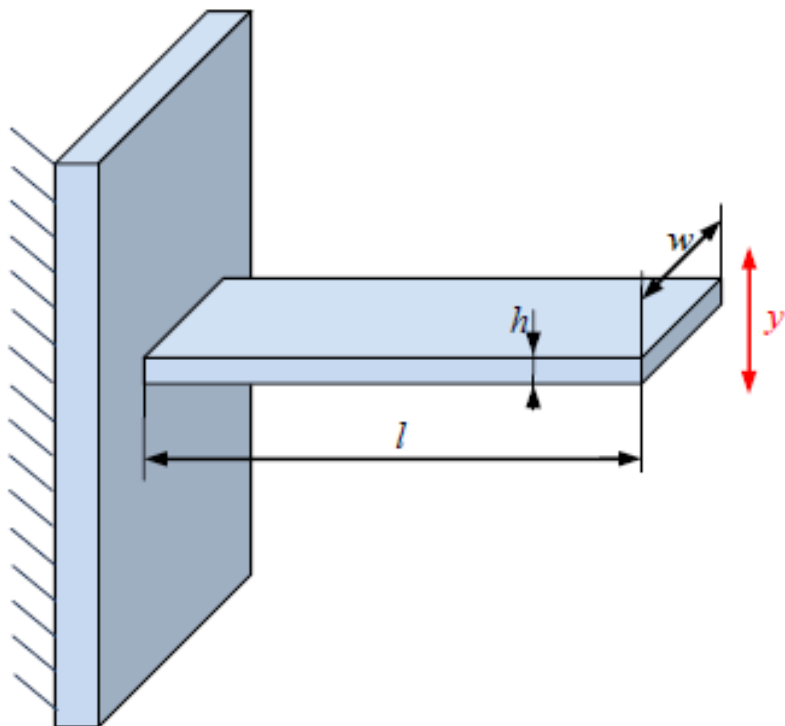
Напречната еластична константа намалява с третата степен на S . Омекотяването е с две степени по-високо от това при огъване или опън.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\varphi_0} S^3}{J_0 S^5}} = f_0 \sqrt{\frac{S^3}{S^5}} = f_0 S^{-1}$$

Ъгловата собствена честота се увеличава пропорционално на мащаба.



Мащабиране при напречни трептения и разпределена маса



$$f_1 = \frac{a}{2\pi} \left(\frac{1,875}{l^2} \right)$$

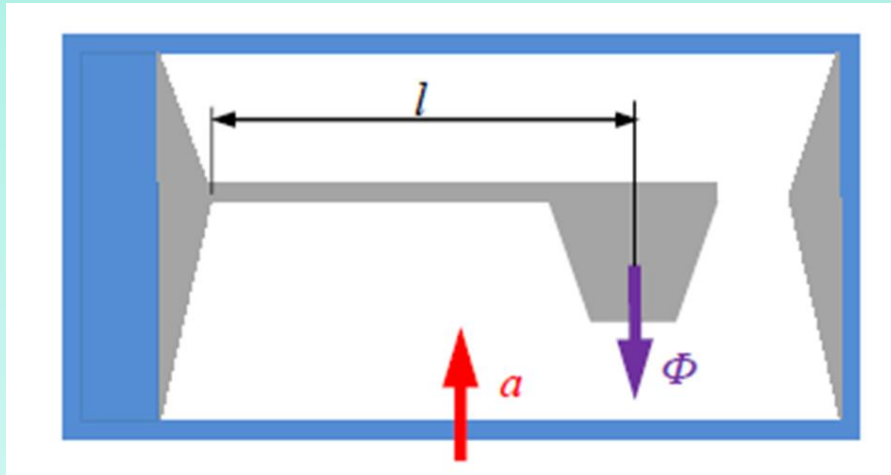
$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + a \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0$$

$$a^2 = \frac{EI}{A\rho}$$

$$f_s = \frac{\sqrt{\frac{EI_0 S^4}{A_0 S^2 \rho}}}{2\pi} \left(\frac{1,875}{l_0^2 S^2} \right) = f_0 S^{-1}$$



Максимално работно ускорение



$$\Phi = -ma$$

$$\sigma_y = \frac{M_{y\max}}{W_y} = \frac{6ma_{\max}l}{wh^2} \leq [\sigma_y]$$

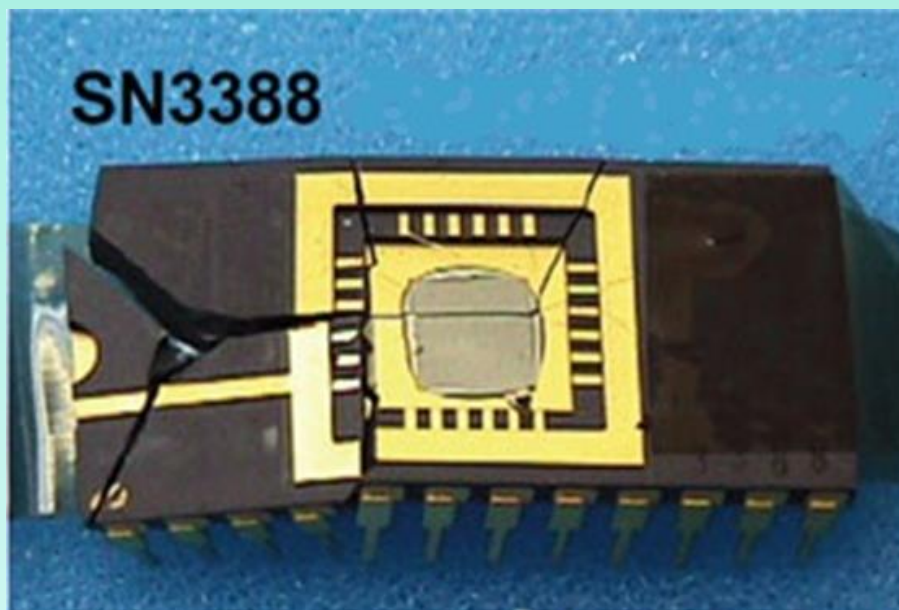
$$M_{\max} = ma_{\max}l$$

$$W_y = wh^2/6$$

$$a_{\max} \leq \frac{wh^2 [\sigma_y]}{6ml}$$

$$a_{\max_S} \leq \frac{w_0 S h_0^2 S^2 [\sigma_y]}{6m_0 S^3 l S} = a_{\max_0} S^{-1}$$

*Извод:
По-малката система
може да работи при
по-голямо ускорение!*



MEMS акселерометър след тест за надеждност,
проведен с ускорение 40000 g



Мащабиране и топлинни процеси

Чрез температурната времеконстанта

$$\tau = \frac{mc_p}{KA},$$

K - коефициент на топлопроводимост

c_p - специфичен температурен
капацитет при постоянно налягане

се определя времето за загряване (охлаждане) на тяло. Мащабираната температурна времеконстанта е

$$\tau_s = \frac{mS^3 c_p}{KAS^2} = \tau S$$

Извод: Колкото по-малки са размерите, толкова по-бързо се загрява (охлажда) тялото.



Мащабиране и флуидни процеси

Число на Рейнолдс:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu},$$

L и v са съответно характеристични дължина и скорост, μ - вискозитет.

$Re < 2000$ - ламинарно течение, разпределението на скоростите в напречно сечение на канала е параболично, доминират вискозните сили.

$Re > 4000$ - турбулентно течение, доминиращи са инерционните сили. В

$2000 < Re < 4000$ преходен интервал, природата на потока зависи грапавостта на стените на канала.

От формулата е видно, че мащабът S влияе на Re пропорционално, което означава, че микрофлуидните движения са преобладаващо ламинарни.

Отношението на средния молекулярен свободен поток към характеристикния размер на флуидния поток се нарича число на Кнудсен (Knudsen)

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

Чрез числото на Кнудсен газовете се класифицират на:

- континуум $Kn < 0.01$;
- хлъзгане $Kn < 0.1$;
- преход $0.1 < Kn < 10$;
- свободно молекулярни $Kn > 10$.

Въпреки че все още няма достатъчно изследвания преобладават мненията, че микросистемните газови потоци спадат към вторият случай – **хлъзгане**. При тях СМСП е около $0,1 \mu\text{m}$, а характеристикните дължини са около $2 \mu\text{m}$.



Мащабиране в електрически системи

Съпротивление R на проводник

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

$$R_s = \frac{\rho L_0 S}{A_0 S^2} = R_0 S^{-1}$$

Капацитет C на плосък кондензатор

$$C = \frac{\varepsilon A}{g}$$

$$C_s = \frac{\varepsilon A_0 S^2}{g_0 S} = C_0 S,$$

Индуктивност L на соленоид

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

$$L_s = \frac{\mu N^2 A_0 S^2}{l S} = L_0 S,$$



Наносистеми и наноелектромеханични системи (НЕМС)

Наноелектромеханичните системи са подобни на MEMS, но с по-малки размери. При тях има малки премествания и сили с молекулярна природа.

Два подхода:

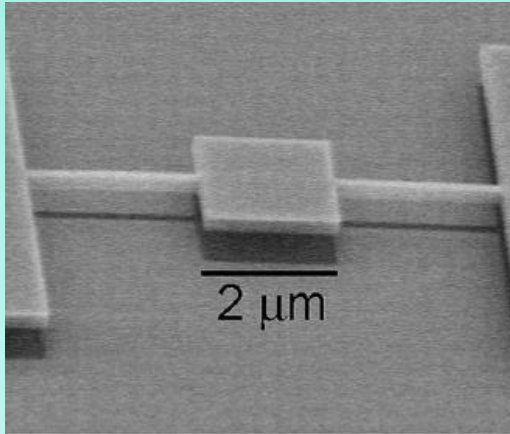
„От върха надолу“ (*top-down*) – съвкупност от инструменти, проектирани да изграждат по-малки съвкупности от инструменти. Например завод произвежда продукция с милиметрови размери, която продукция се използва за производство на микроразмерни продукти, които произвеждат наноразмерни продукти.

„От долу нагоре“ (*bottom-up*) - може да се опише на поставяне на единични атоми или молекули до достигане на желаното ниво на сложност и функционалност в дадено устройство. Такъв подход се използва в системи за молекулярно сглобяване или имитиране на молекулярна биология.

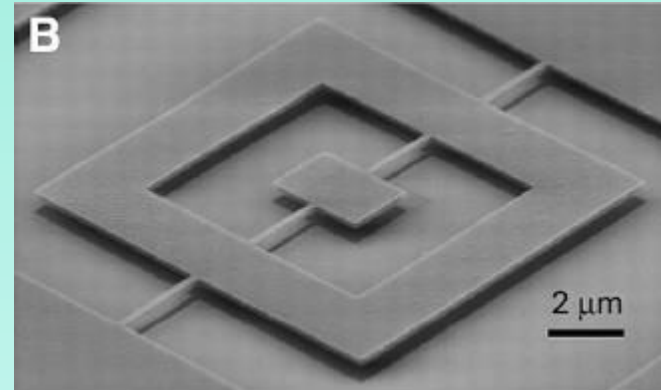
Възможна е комбинация от тези два подхода, при която наноразмерни молекули се интегрират чрез създадени «от върха надолу» наноустройства.



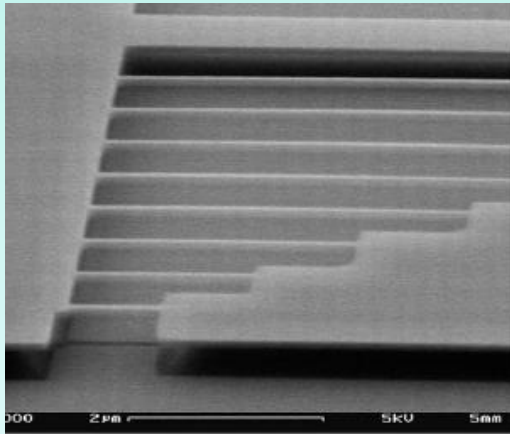
Наносистеми и НЕМС



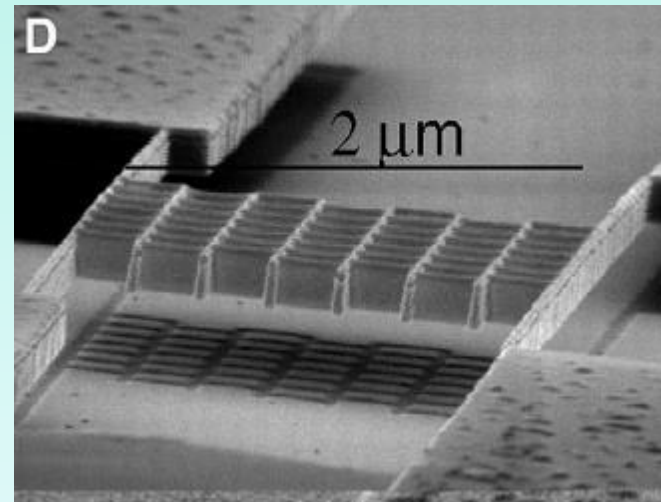
Торзионен осцилатор



Сложен торзионен осцилатор



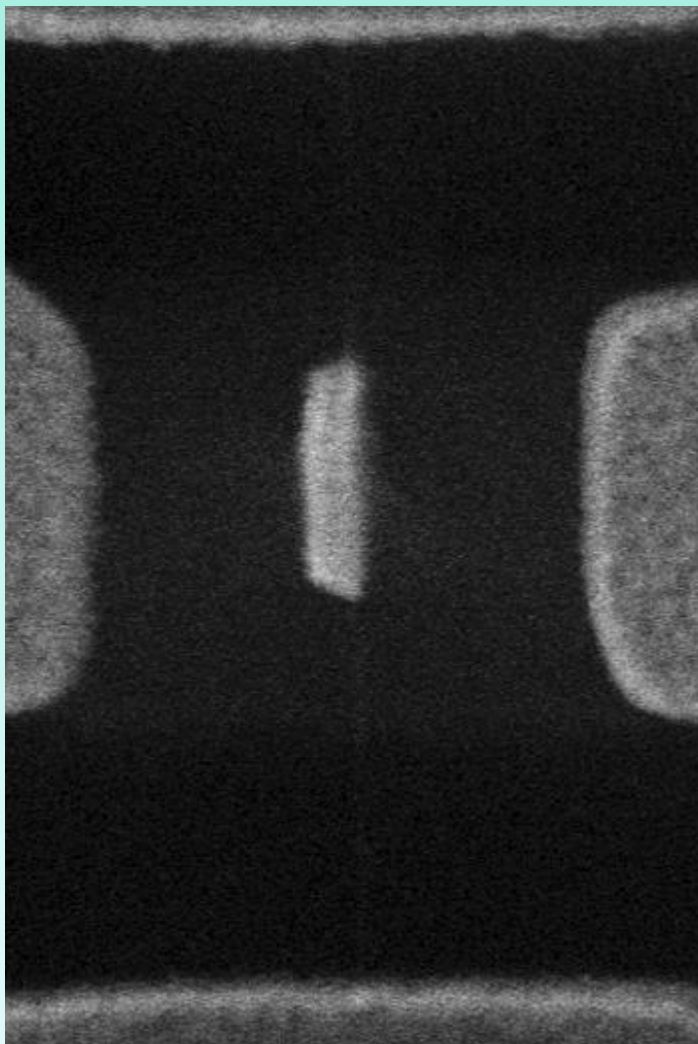
Група силициеви нановлакна



Мрежа от осцилиращи силициеви огледала



Нанолагери

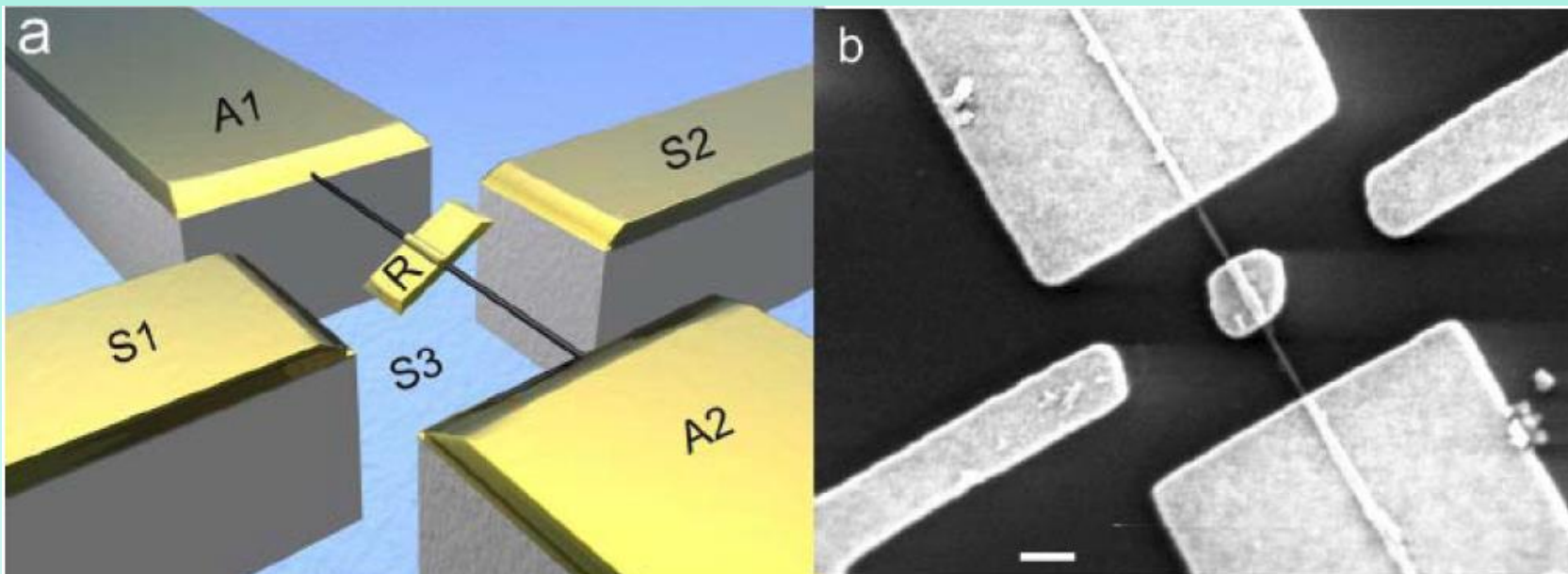


Ротационни лагери, базирани на многостенни въглеродни нанотръби. Чрез поставяне на златна пластина (с размери от порядъка на 100 nm) към външната обвивка на окачена многостенна въглеродна нанотръба е постигнато електростатично въртене на външната обвивка по отношение на вътрешната сърцевина.

Тези лагери са много здрави. Устройството е извършило хиляди обороти без никакви признаци на износване.



Наномотор



200 nm

Схема на мотора: R - окачена на нанотръба метална пластина; A1,A2 – неподвижни котви; S1, S2, S3 - статор

Снимка от сканиращ микроскоп на реалния мотор

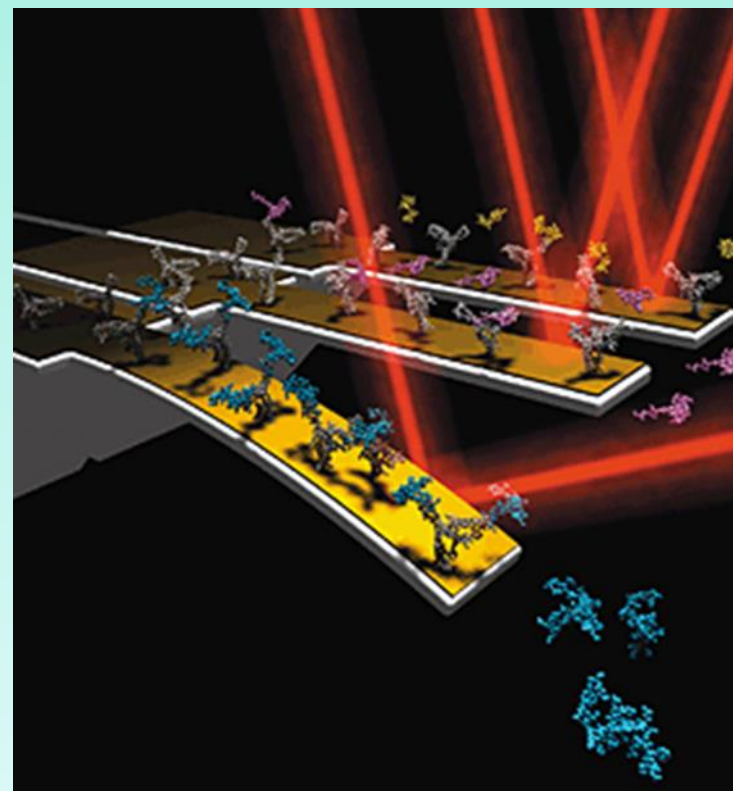
Fennimore, Yuzvinsky, Zettl et al Nature 2003

Биоком (BioCom) чип

Три конзоли, покрити с три различни антитела, са изложени на специфичен за простатата антиген (PSA)

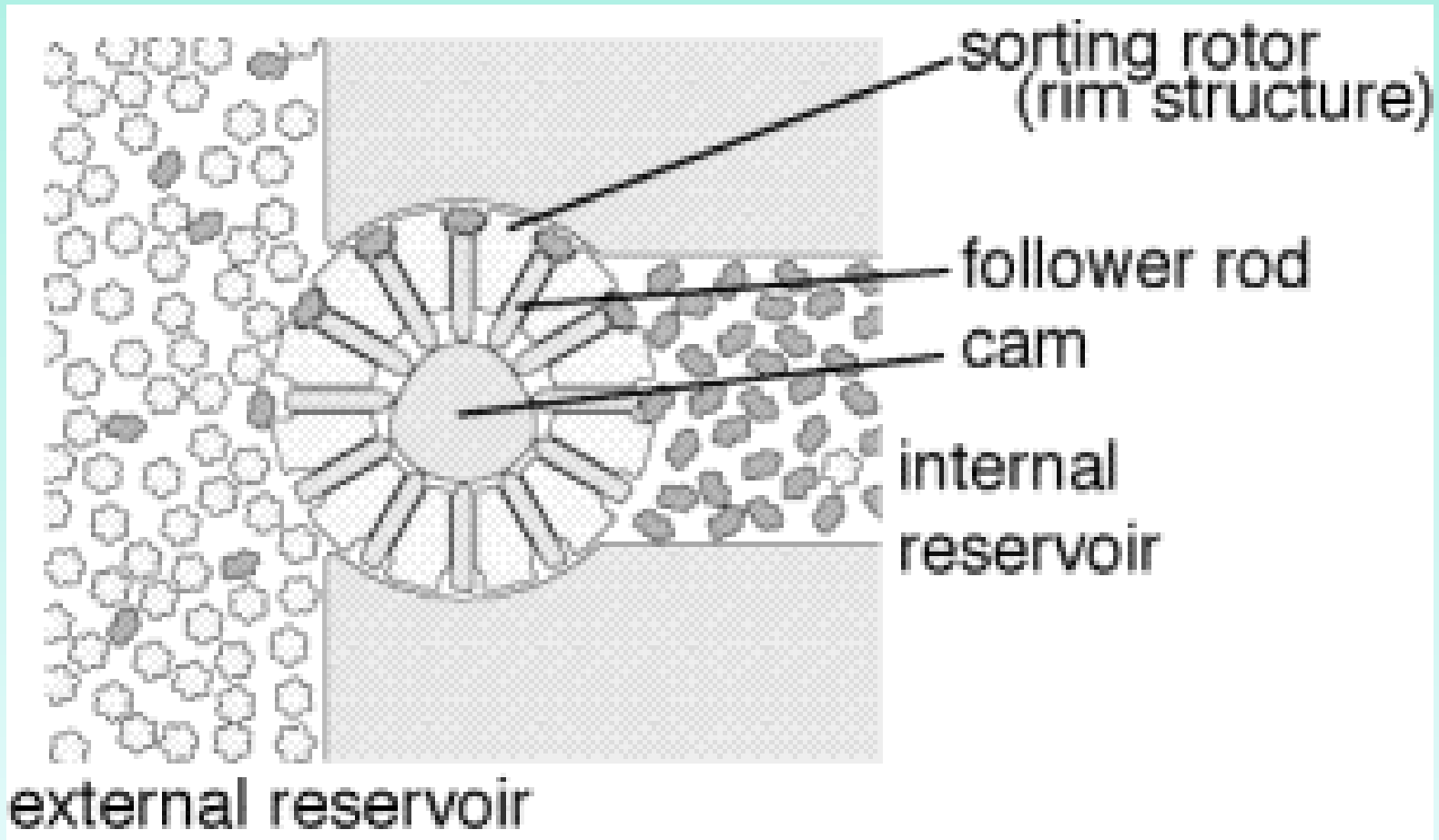
Лявата конзола се огъва, тъй като PSA се свързва с анти-PSA антитялото върху конзолата

Другите конзоли не се огъват, защото антителата им не се свързват с PSA.



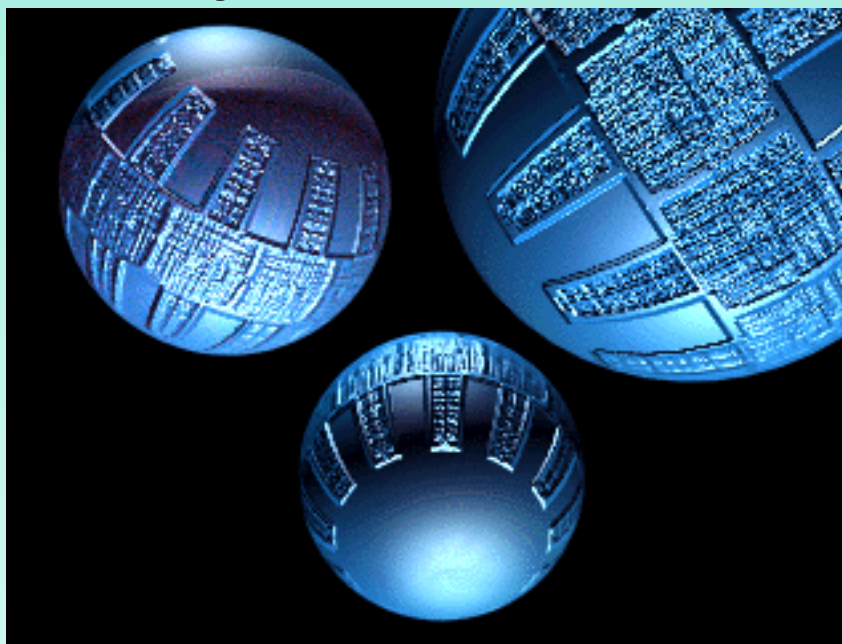


Възможни приложения: кислородно-селективна помпа





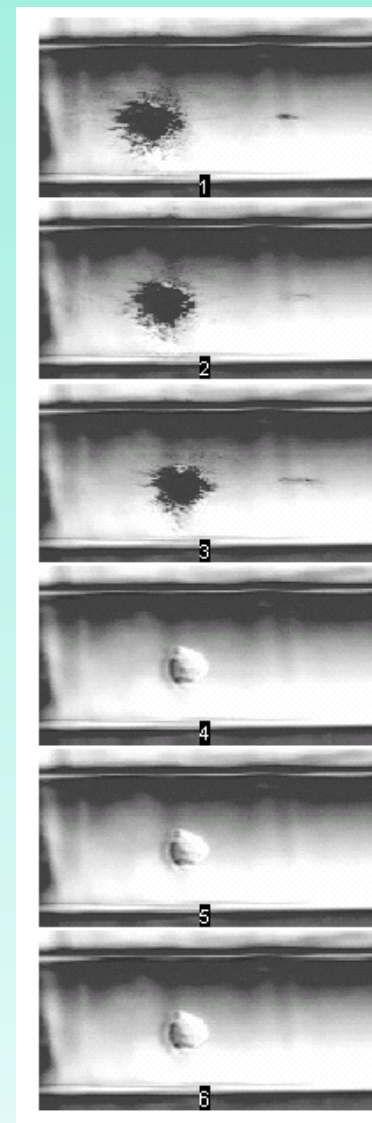
Респироцити: Механични изкуствени червени клетки



- Поставен в кръвта сферичен 1 μm диаманоид 1000-атм съд под налягане
- Активна помпа, захранвана от ендогенна серумна глюкоза
- Може да доставя 236 пъти повече кислород към тъканите на единица обем, отколкото природните еритроцити и да управлява въглеродната киселинност

Тъканно инженерство

Нано/микрочастици, включително живи животински клетки, бактерии и колоидно злато (100 nm), могат да бъдат оптически насочени и нанесени в произволно определени триизмерни масиви, процес, наречен "лазерно насочено директно писане".



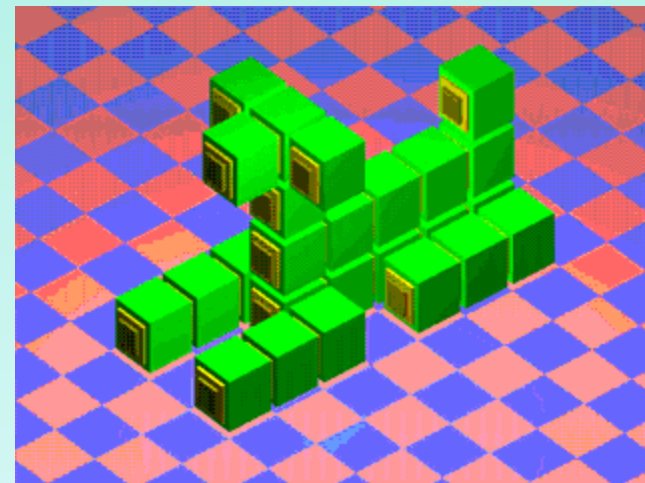
Фрактални роботи

Фракталните роботи са нови видове роботи, направени от моторизирани кубични тухли, които се движат под компютърно управление.

Тези кубични моторизирани тухли могат да бъдат програмирани да се движат и да се разбъркват, за да променят формата си и да направят предмети в различни форми буквално за няколко секунди, поради техните моторизирани вътрешни механизми.

Очаква се фракталните роботи да са посредник между трудностите в технологиите на молекулярната нанотехнология и практическата лекота на електромеханичното инженерство.

Възможно е те да внедрят продуктите за цифрово управление в наносистемите и да ни подготвят за настъпващото бъдеще.





Нанопредавки





Технически университет - София
Ние **успяваме!**



МТФ
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ

Благодаря за вниманието!