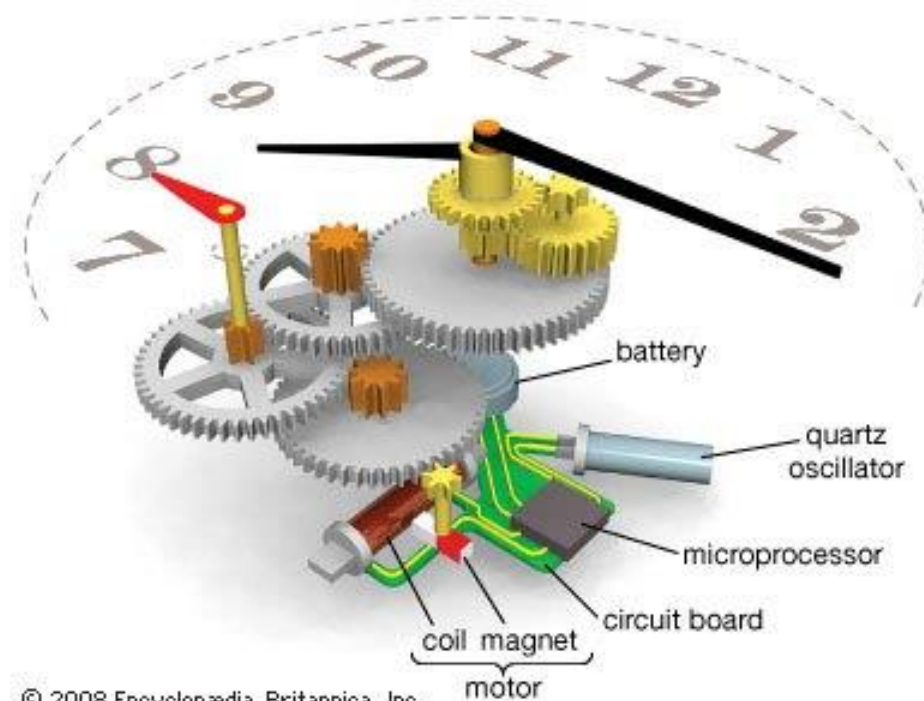
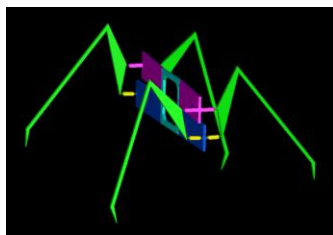


# 9.0. ПИЕЗОЕЛЕКТРИЧНИ МЕМС

Проф. д-р Тодор Тодоров

tst@tu-sofia.bg



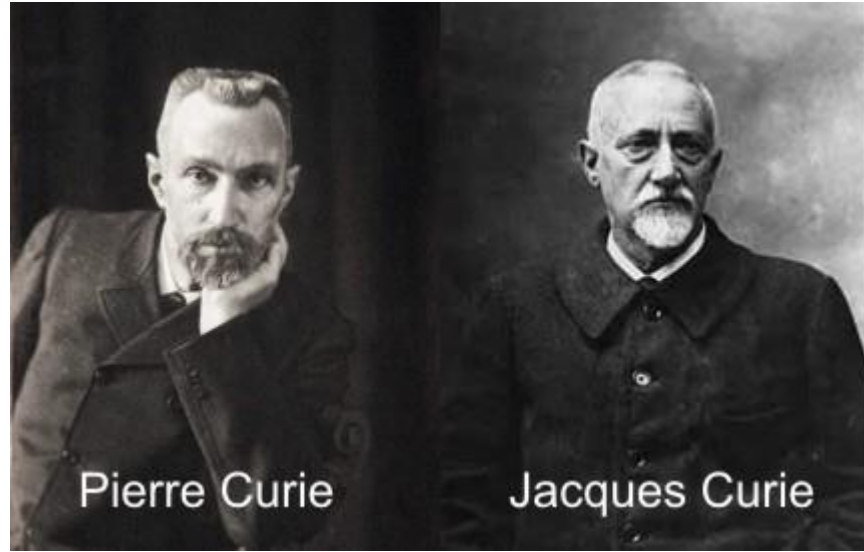
# Съдържание

- Пиезоелектричен ефект
- Пиезоелектрични материали
- Пиезоелектрични актуатори
  - Нерезонансни
  - Резонансни
- Пиезоелектрични сензори
  - Детекция на заряд
  - Акустични вълни
  - Ултразвукови



# Пиезоелектричен ефект

- Пиезоелектричният ефект е открит през 1880 от Jacques и Pierre Curie:
- Механичната деформация на някои материали генерира електрическо напрежение (пиезоелектричен ефект).
- Прилагането на електрическо напрежение към някои материали в зависимост от поляритета предизвиква механична деформация (обратен пиезоелектричен ефект).

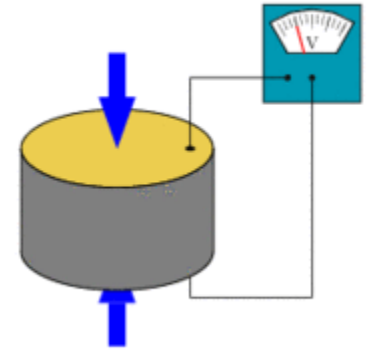


Pierre Curie

Jacques Curie

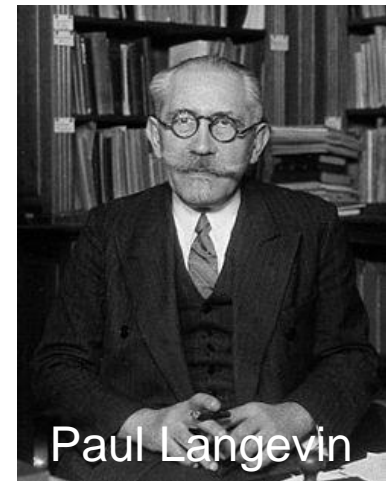
1859 – 1906

1856–1941



Jonas Ferdinand

Gabriel Lippmann 1845 -1921



Paul Langevin

1872 –1946

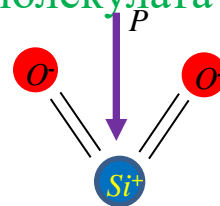
# Обща класификация на диелектричните материали

**Диелектрик** – няма свободни електрични заряди, не провежда ток (идеален диелектрик).

Два по два свързани положителни и отрицателни заряди  $q$ .

Когато центровете на положителните и отрицателните товари на едни атом или молекула са разделени на някакво разстояние  $d$ , атомът или молекулата притежава **електричен диполен момент**

$$\vec{p} = q\vec{d}$$



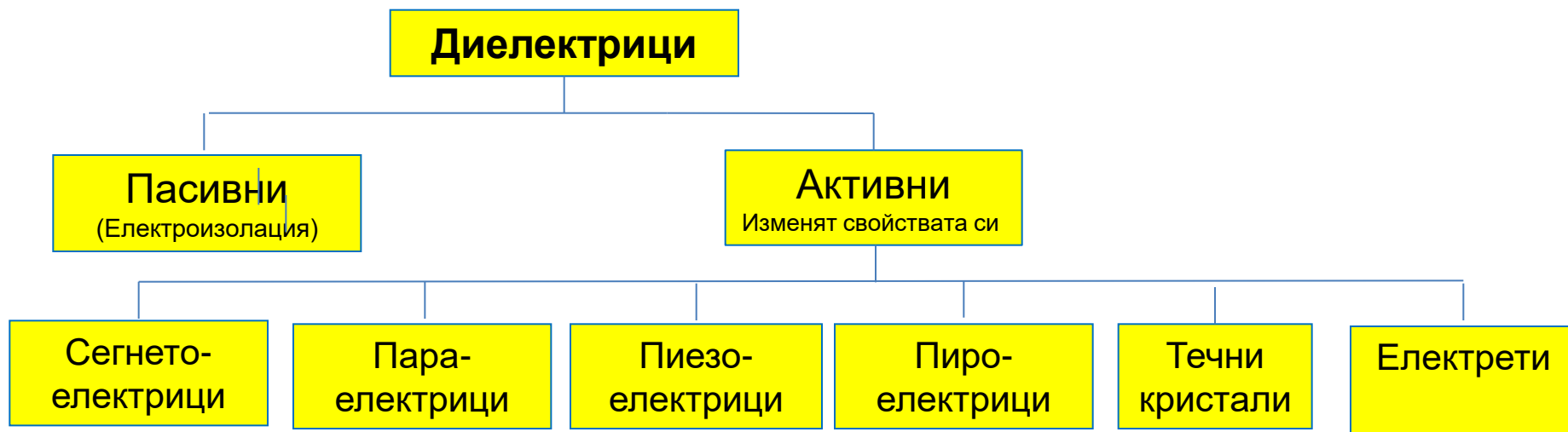
където  $q$  [C] е електрическият заряд и  $d$  [m] е разстоянието между положителния и отрицателен център на зарядите. Посоката на вектора диполен момент  $p$  [Cm] е от отрицателния към положителния заряд.

Сумата от всички електрични диполни моменти на огромния брой молекули или атоми на един диелектрик за единица обем  $V$  [m<sup>3</sup>] се нарича електрична поляризация

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}$$

**Поляризация** – когато диелектрият е поставен в електрическо поле се получава преориентиране на диполите по посока на полето

# Обща класификация на диелектричните материали



**Сегнетоелектриците** в определен температурен интервал имат собствен електрически диполен момент, който може да бъде преориентиран за сметка на приложено външно електрично поле

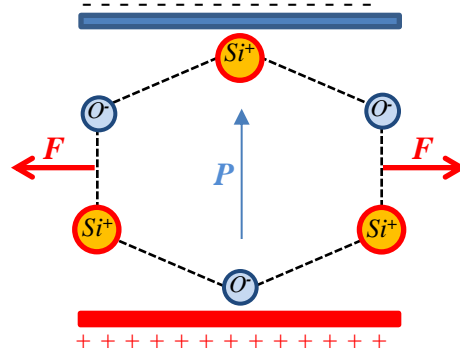
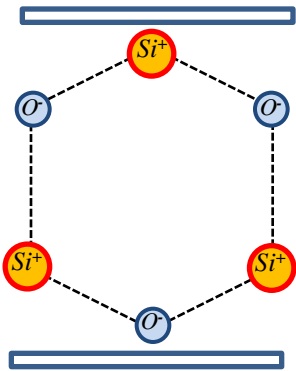
**Параелектриците** е нелинеен диелектрик, със спонтанна поляризация, относителната му диелектрическа проницаемост намалява с нарастване на температурата

**Пироелектриците** силно изменят поляризацията си  $P$  при изменение на температурата

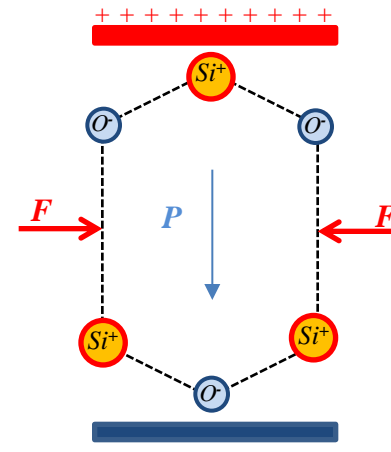
**Течни кристали** – проявяват особени диелектрични свойства при преминаване от твърда в течна фаза

**Електретите** са диелектрици, които дълго време запазват поляризацията си и създават в пространството електрично поле, т.е. те са формално аналози на постоянните магнити.

# Същност на пиезоелектричния ефект



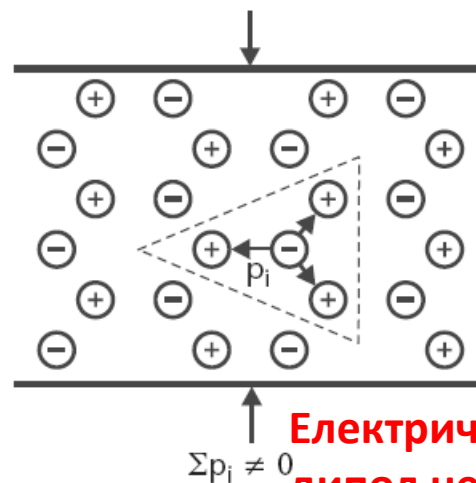
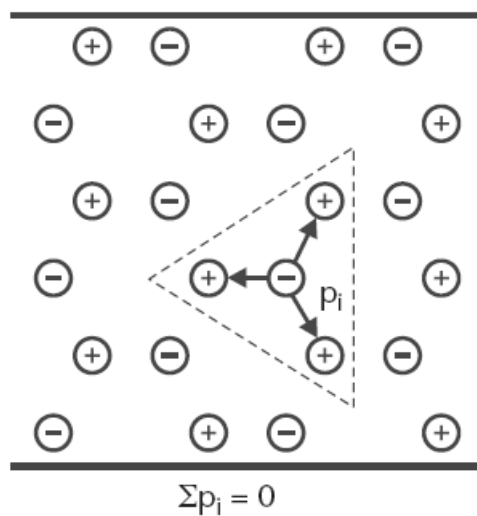
б)



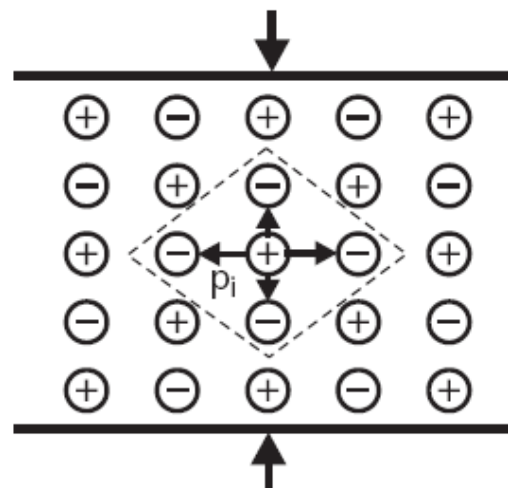
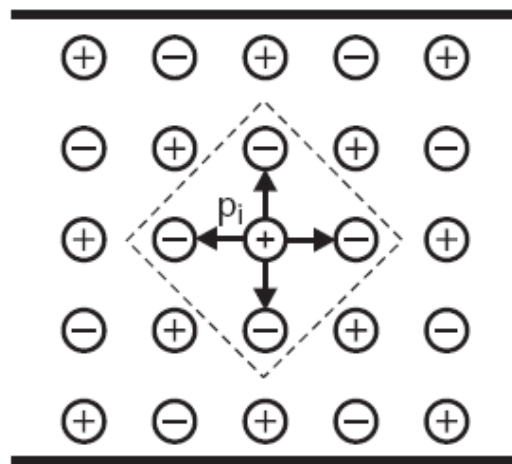
в)

# Същност на пиезоелектричния ефект

Само кристали с липсващ център на симетрия притежават пиезоелектрични свойства.



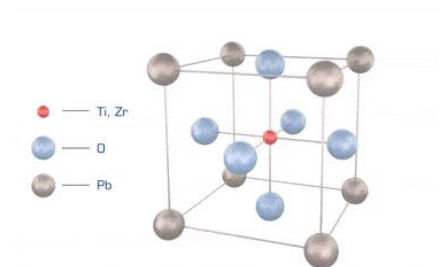
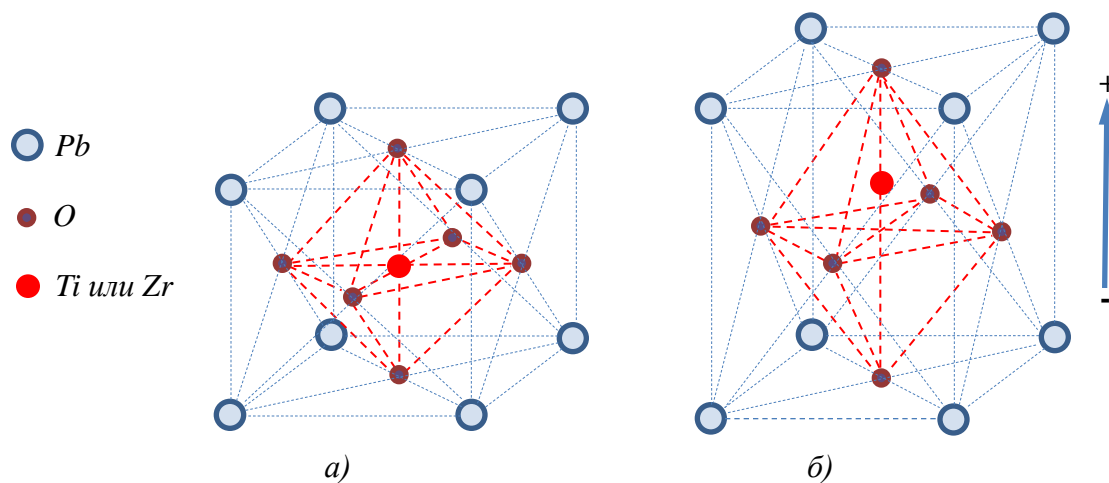
**Електричният дипол не е нула след деформацията**



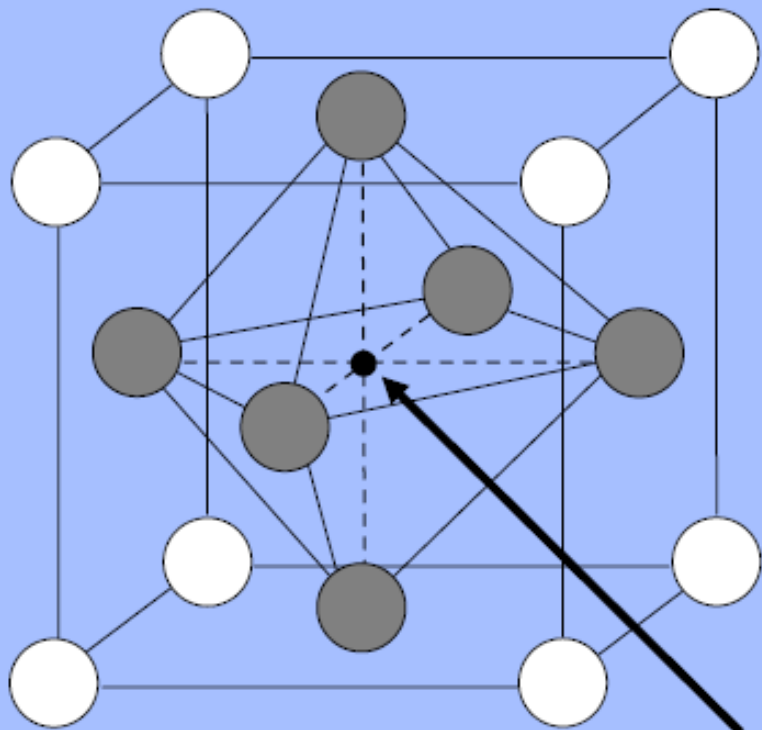


# Същност на пиезоелектричния ефект

Структурата на минерала перовскит или калциев титанат  $\text{CaTiO}_3$ . Перовскитът е открит през 1839 г. в Урал от Gustav Rose и е наречен така в чест на руския държавник и геолог граф Лев Перовский. Структурата на пиезоелектричната керамика PZT е съставена от единични кристали със структура тип перовскит. Керамиката PZT е смес от кристали на оловен цирконат  $\text{PbZrO}_3$  и оловен титанат  $\text{PbTiO}_3$ . Тези кристали се описват с обобщена перовскитова структура  $\text{ABO}_3$ , в която А и В са катиони

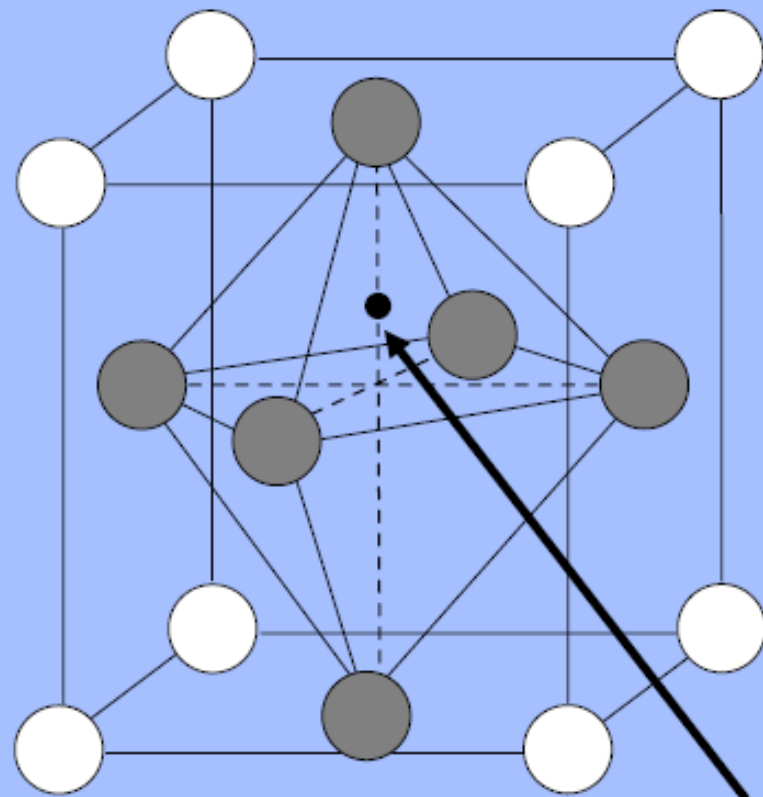


Поляризиране на PZT кристал: а) над температурата на Кюри няма формиран електричен дипол; б) под температурата на Кюри се генерира дипол чрез външно електрическо поле или чрез удължаване (свиване) на кристала



Central  
cation

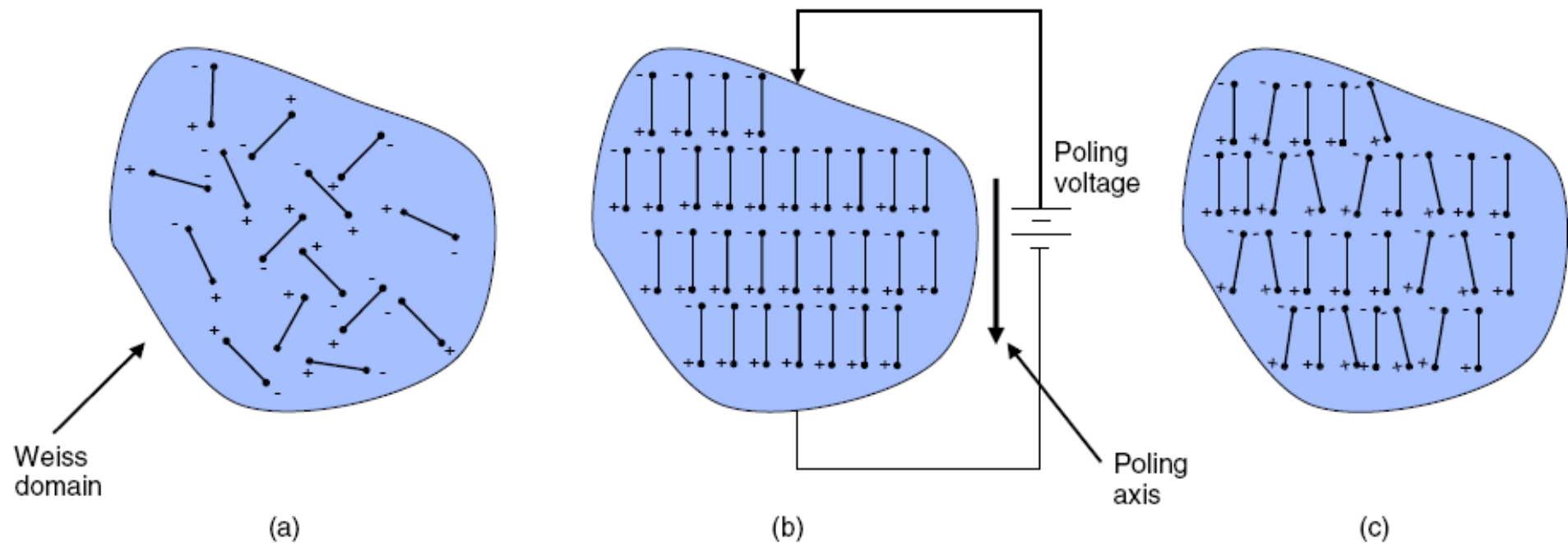
(a)



Central  
cation

(b)

Над определена температура известна като температура на Curie (TC) пиезоелектричните материали имат проста кубична симетрия (а), единичната клетка съдържа централен катион (черната точка) и няма диполен момент т.е. отрицателните и положителните заряди се уравниават. Под TC, тези кристални структури се променят в тетрагонална симетрия (б), при която положителните и отрицателни товари не се уравниават. Централният катион се е изместил от центъра на клетката. Такива материали се наричат още фероелектрични, защото имат поведение, аналогично на феромагнитните материали. Диполите се ориентират в произволни посоки.

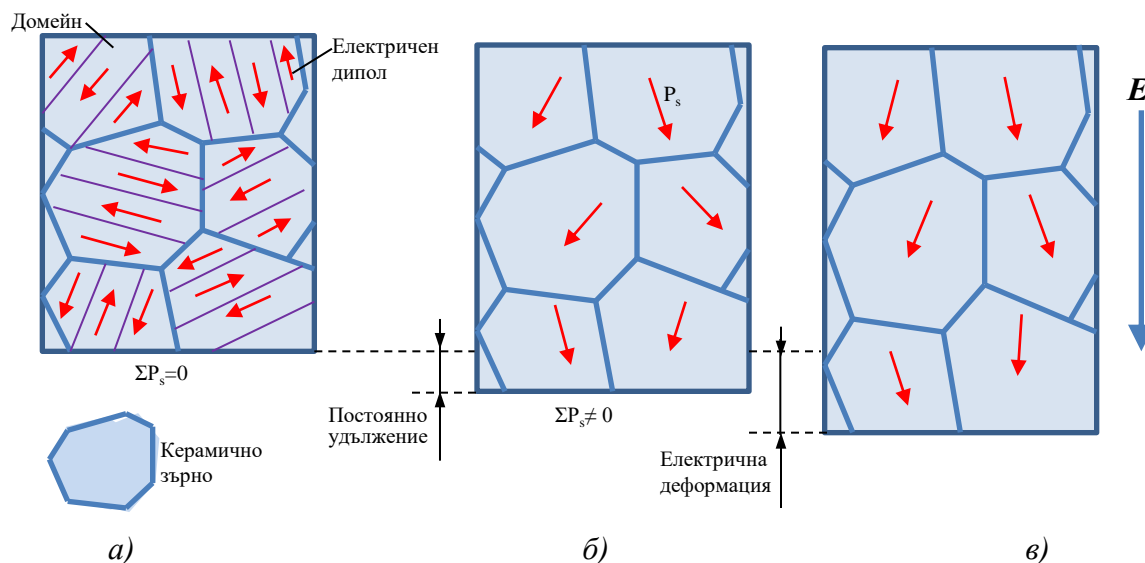


Фероелектричните материали може да се преобразуват в пиезоелектрични, ако се подложат на силно електрическо поле при температура малко под  $T_C$  в произволно избрана ос. Този процес се нарича поляризиране (poling). Под влияние на полето материалът се удължава по оста на поляризация. Когато полето се премахне, диполите остават заключени приблизително еднакво ориентирани. Тази ориентация на диполните моменти в различни Weiss домейни придава на кристала свойства на пиезоелектрик.

# Същност на пиезоелектричния ефект

Диполите се подреждат в малки области, **наречени домейни**, които формират големи диполни моменти.

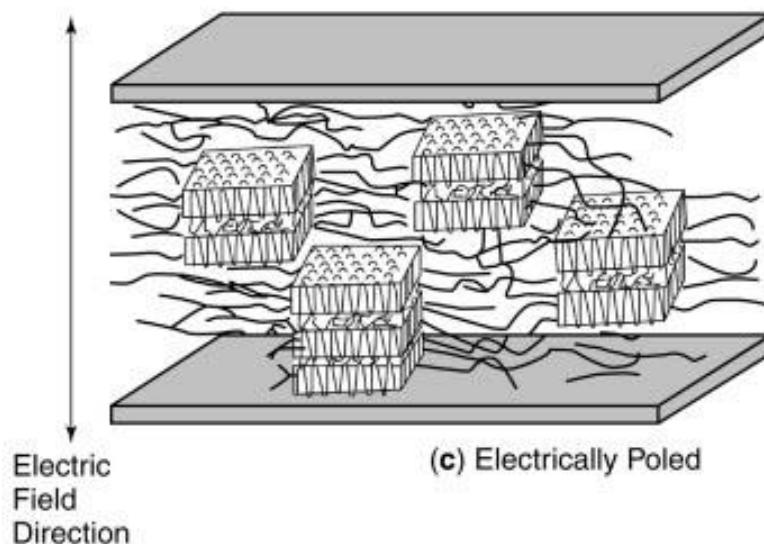
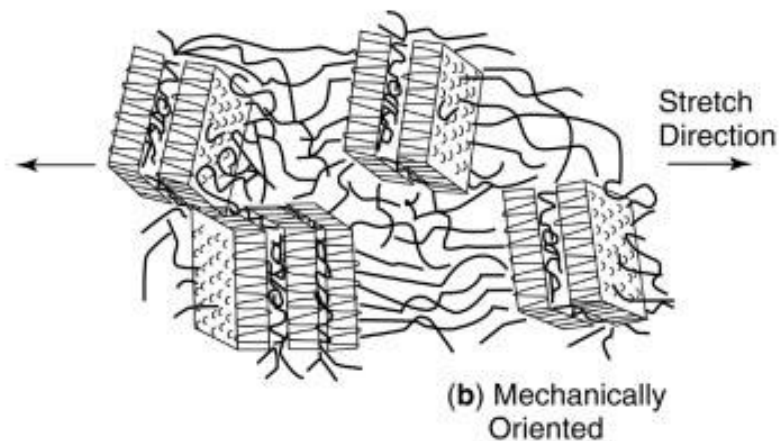
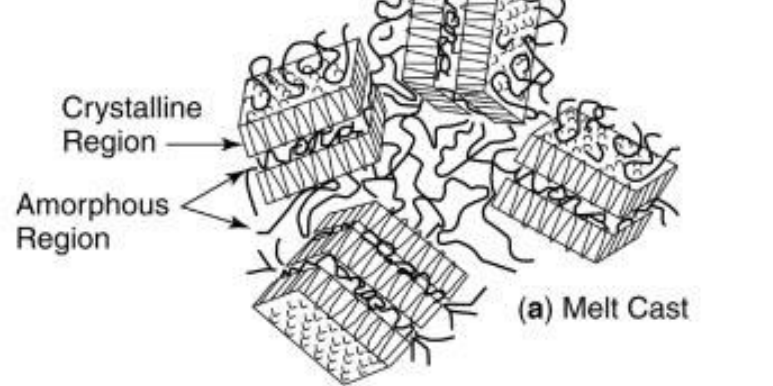
Ако керамиката се подложи поне веднъж на електрическо поле (операция наречена **поляризиране**), диполите на домейните се ориентират в посока близка на тази на полето.



*Макроскопична структура на PZT керамика: а) случайно ориентирани домейни; б) след поляризация домейните се ориентират по посока на полето; в) поляризираният материал е подложен на електрическо поле*

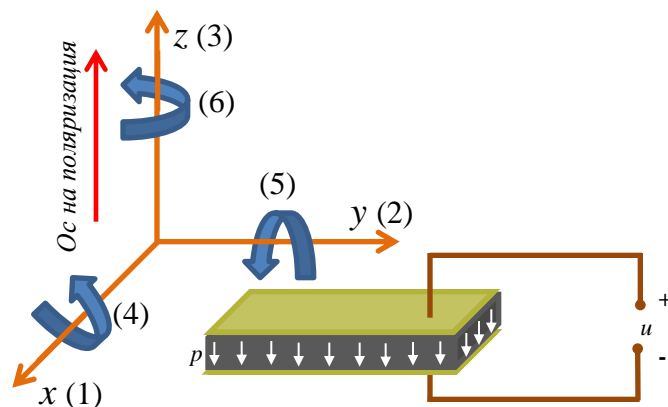
# Случайни аморфни и кристални слоеве в PVDF полимер

а) морфология след както филмът е стопен. б) след ориентиране на филма чрез няколкократно механични разтягания; в) след разполагане между метални електроди и поляризиране



# Основни уравнения на пиезоелектричните преобразувания

Връзките между параметрите на електрическото поле и механичните напрежения при пиезоелектричния ефект се изразяват чрез тензори. За целта се използва дясно ориентирана координатна система. Нормалните направления по координатните оси  $x$ ,  $y$  и  $z$  се означават съответно с числата 1, 2, и 3 а тангенциалните с 4, 5 и 6..



Ос 3 се ориентира по направление на първоначалната поляризация на пиезоелектричния материал, а оси 1 и 2 лежат в равнина перпендикулярна на ос 3. Първият индекс се отнася за оста на възбуждане а вторият индекс е за оста на въздействието. В механичния област тези променливи са механично напрежение и относителна деформация, а в електрическата област - електрическо преместване и електрическо поле.

# Основни уравнения на пиезоелектричните преобразувания

Основните уравнения, чрез които се описват пиезоелектричните свойства следват от допускането, че тоталната относителна деформация в един преобразувател е сума от механичната относителна деформация, предизвикана от механичното напрежение и управляемата относителна деформация причинена от електрическото напрежение. За показания на горната фигура пиезоелектричен преобразувател са валидни формулите:

$$S = d_{33}E + s^E T$$

$$D = \varepsilon^T E + d_{33}T$$

$D$  [C/m<sup>2</sup>] е електрическо преместване (плътност на електрическия поток или заряда за единица площ);

$E$  [V/m] е приложеното електрическо поле

$T$  [Pa] е вектор на напреженията

$S$  е относителната деформация

$\varepsilon^T$  [F/m] е диелектричната проницаемост, измерена при постоянно механично напрежение  $T$

$s^E$  [m<sup>2</sup>/N] податливост (реципрочната стойност на модула на Юнг), измерена при постоянно електрическо поле  $E$

$d_{33}$  (C/N), (m/V) пиезоелектрична константа, индексът 33 следва от това, че в разглеждания преобразувател, поляризацията и електрическото поле са успоредни на направлението 3, както е показано на фигурата горе.

# Основни уравнения на пиезоелектричните преобразувания

Ако към пиезоелектричния преобразувател не е приложена външна сила, но е включено електрическо напрежение по същото направление на поляризацията това напрежение предизвиква удължение или свиване в зависимост от поляритета, а явлението се нарича обратен пиезоелектричен ефект. Съгласно формула (1.7) относителната деформация се изчислява чрез израза

$$S = d_{33}E$$

При правия пиезоелектричен ефект, ако разгледаме преобразувателят с отворена електрическа верига на електродите т.е. при плътност на електрическия ток  $D = 0$  следва

$$E = -\frac{d_{33}T}{\epsilon^T}$$



# Основни уравнения на пиезоелектричните преобразувания

Ако приемем, че независимите променливи величини са електрическото поле  $E$  и относителната деформация  $S$ , от горните уравнения следва

$$\begin{Bmatrix} D \\ T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T (1 - k^2) & e_{33} \\ -e_{33} & c^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ S \end{Bmatrix}$$

$$c^E = \frac{1}{s^E}$$

[Pa] е модулът на Юнг при свързани на късо електроди, т.е. при  $E=0$ .

$$e_{33} = d_{33} / s^E$$

[C/m<sup>2</sup>] е произведението на пиезоелектричната константа и модула на Юнг и изразява отношението на електрическото преместване към относителната деформация при електроди на късо.

$$e_{33} = d_{33} / s^E$$

[C/m<sup>2</sup>] е произведението на пиезоелектричната константа и модула на Юнг и изразява отношението на електрическото преместване към относителната деформация при електроди на късо. Параметърът изразява също така и отношението на напрежението на деформация към електрическото поле, когато преобразувателят е блокиран, т.е. относителната деформация е  $S = 0$

$$k^2 = \frac{d_{33}^2}{s^E \varepsilon^T} = \frac{e_{33}^2}{c^E \varepsilon^T}$$

се нарича **коэффициент на електромеханично свързване на материала** и измерва **коэффициента на полезно действие на преобразуването на механичната енергия в електрическа и обратно**

# Основни уравнения на пиезоелектричните преобразувания

Уравнения (1.6) и (1.7) в общия случай се описват чрез тензорни зависимости.

$$\mathbf{S} = d^T \mathbf{E} + s_E \mathbf{T}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_T \mathbf{E} + d^T \mathbf{T}$$

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^T & \varepsilon_{12}^T & \varepsilon_{13}^T \\ \varepsilon_{21}^T & \varepsilon_{22}^T & \varepsilon_{23}^T \\ \varepsilon_{31}^T & \varepsilon_{32}^T & \varepsilon_{33}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}$$

**Кварцът** е един от най-разпространените пиезоелектрически материали. Матрицата на неговите пиезоелектрични коефициенти изглежда така:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = -d_{12} = 2,31 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$d_{14} = d_{25} = -0,67 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$$

$$\varepsilon_r = 4,5$$

**Сегнетова сол** –  $d_{14} = 467 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ ,

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{bmatrix}$$

Висока чувствителност към тангенциални напрежения, хигроскопична, незадоволителни метрологични характеристики. Използва се за преобразуване на малки сили натриево-калиев тартарат  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  дава името на този клас материали

**Бариев титанит** – силно температурно зависим,  $\varepsilon_r = 1200 - 1700$ .

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$d_{15} = 246 \cdot 10^{-12}, \quad d_{31} = -77 \cdot 10^{-12}$$

$$d_{33} = 187 \cdot 10^{-12}$$

# Енергия на пиезоелектричен преобразувател

$$W_e = \underbrace{\frac{Q^2}{2C(1-k^2)}}_{\text{Електрическа енергия}} - \underbrace{\frac{d_{33}K_a}{C(1-k^2)} Q\Delta}_{\text{Пиезоелектрична енергия}} + \underbrace{\frac{K_a}{1-k^2} \frac{\Delta^2}{2}}_{\text{Еластична енергия}}$$

$\Delta = Sg_0$  е абсолютната деформация

$K_a = \frac{A}{s^E g_0}$  е коефициент на еластичност при свързани на късо електроди

$Q = AD$  е пълният електрически заряд

# Коенергия на пиезоелектричен преобразувател

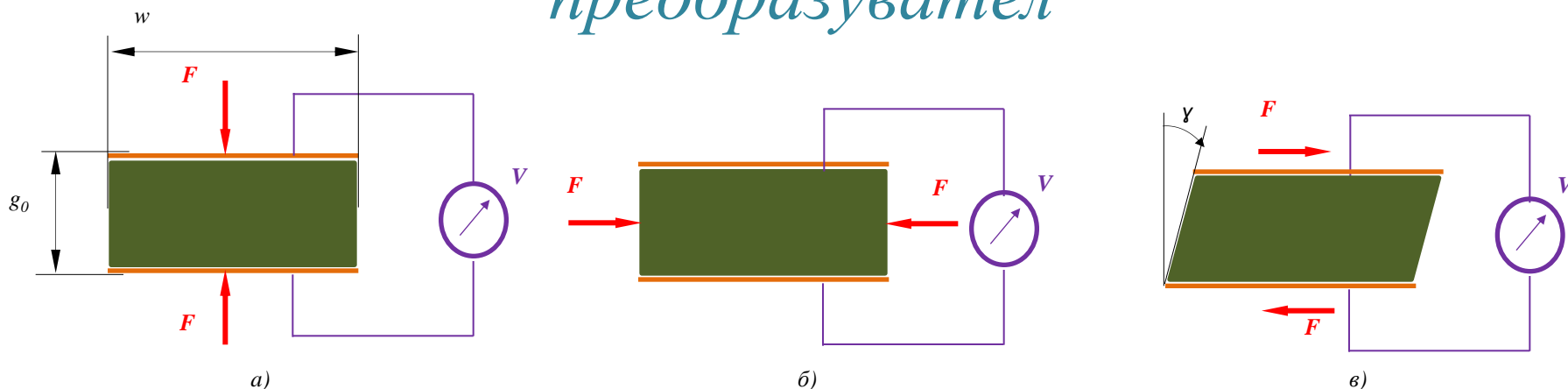
$$W_e^*(\Delta, V) = C(1 - k^2) \frac{V^2}{2} + d_{33} K_a V \Delta - K_a \frac{\Delta^2}{2}$$

Коенергията  
на кондензатор  
с капацитет  
 $C(1 - k^2)$

Пиезоелектричната  
коенергия

Потенциалната  
енергия на  
пружина с  
коэффициент на  
еластичност  $K_a$

# Генераторно действие на пиезоелектричен преобразувател



За напречната форма (а) следва

$$E_3 = -\frac{d_{33}T_3}{\epsilon_3} \quad \frac{V_3}{g_0} = -\frac{d_{33}F_3}{\epsilon_3 A}$$

$$V_3 = -\frac{g_0 d_{33} F_3}{\epsilon_3 A_3} = -\frac{d_{33} F_3}{C} = -\frac{g_0 g_{33} F_3}{A_3}$$

$A_3 = lw$  е площта на електродите  $C = \frac{\epsilon_3 A_3}{g_0}$  е капацитетът на преобразувателя

$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_3}$  се нарича пиезоелектрична напрежителна константа

# Генераторно действие на пиезоелектричен преобразувател

За надлъжната форма (б) следва

$$\frac{V_3}{g_0} = -\frac{d_{31}F_1}{\varepsilon_3 A_1} = -\frac{d_{31}F_1}{\varepsilon_3 g_0 w}$$

$$V_3 = -\frac{g_0 d_{31}F_1}{\varepsilon_3 A_1} = -\frac{d_{31}F_1}{\varepsilon_3 w} = -\frac{g_{31}F_1}{w}$$

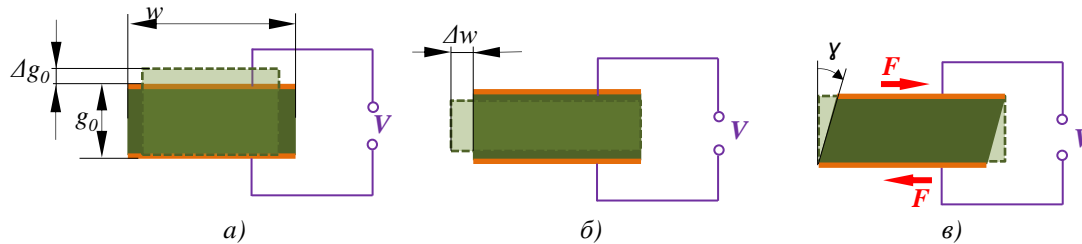
За формата (в) с натоварване на срязване е изведено

$$\frac{V_3}{g_0} = -\frac{d_{51}F_1}{\varepsilon_3 A_3} = -\frac{d_{51}F_1}{\varepsilon_3 lw}$$

$$V_3 = -\frac{g_0 d_{51}F_1}{\varepsilon_3 A_3} = -\frac{g_0 d_{51}F_1}{\varepsilon_3 lw} = -\frac{g_0 g_{51}F_1}{lw}$$

# Актуаторно действие

Върху пиезоелектричния материал се прилага електрическо поле и се получава деформация (преместване).



За надлъжната форма (а) е намерено

$$S_3 = d_{33} E_3 \quad \frac{\Delta g_0}{g_0} = d_{33} \frac{V_3}{g_0} \quad \Delta g_0 = d_{33} V$$

За напречната форма (б) е получено

$$\Delta w = d_{31} V_3$$

За формата с натоварване на срязване (в) е изведено

$$\gamma = d_{15} V_3$$

$\gamma$  е относителна деформация при срязване



# Видове пиезоелектрични материали

## - керамики

$\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$  (PZT),  $\text{PbTiO}_3$  (PT),

## - МОНОЛИТНИ кристали

кварц,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}$  (PZN-PT),  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  (PMN-PT)

## - полимери

PVDF, кополимери, найлон

## -КОМПОЗИТИ

PZT-polymer 0-3, 2-2, 1-3

## - ТЪНКОСЛОЙНИ филми

PZT, PT, ZnO, AlN

# Свойства на най-употребяваните пиезоелектрични материали

Свойство	Мерна единица	PZT-4 керамика	PVDF	ZnO филм	PZT-5H	PZN-PT	PMN-PT [001]	PMN-PT [111]	BaTiO <sub>3</sub>	Na <sub>1/2</sub> K <sub>1/2</sub> NbO <sub>3</sub>
d <sub>33</sub>	10 <sup>-12</sup> C/N	290	-33	25	590	1700	1500-3000	483	190	160
d <sub>31</sub>	10 <sup>-12</sup> C/N	-93	23	-4.7	-105		-800 - 1900		-79	-50
d <sub>15</sub>	10 <sup>-12</sup> C/N	694		-12			<160	3000 – 7000		
K <sub>3</sub>	ε <sub>33</sub> /ε <sub>0</sub>	730	12	8.2	1400				1900	420
tanδ		0.004	0.02		0.03				0.007	0.01
k <sub>31</sub>		0.31	0.12				0.49		0.38	0.45
k <sub>33</sub>		0.69	0.13		0.75		0.9	0.91	0.49	
T <sub>C</sub>	°C	350	150		-200		90	90	130	420

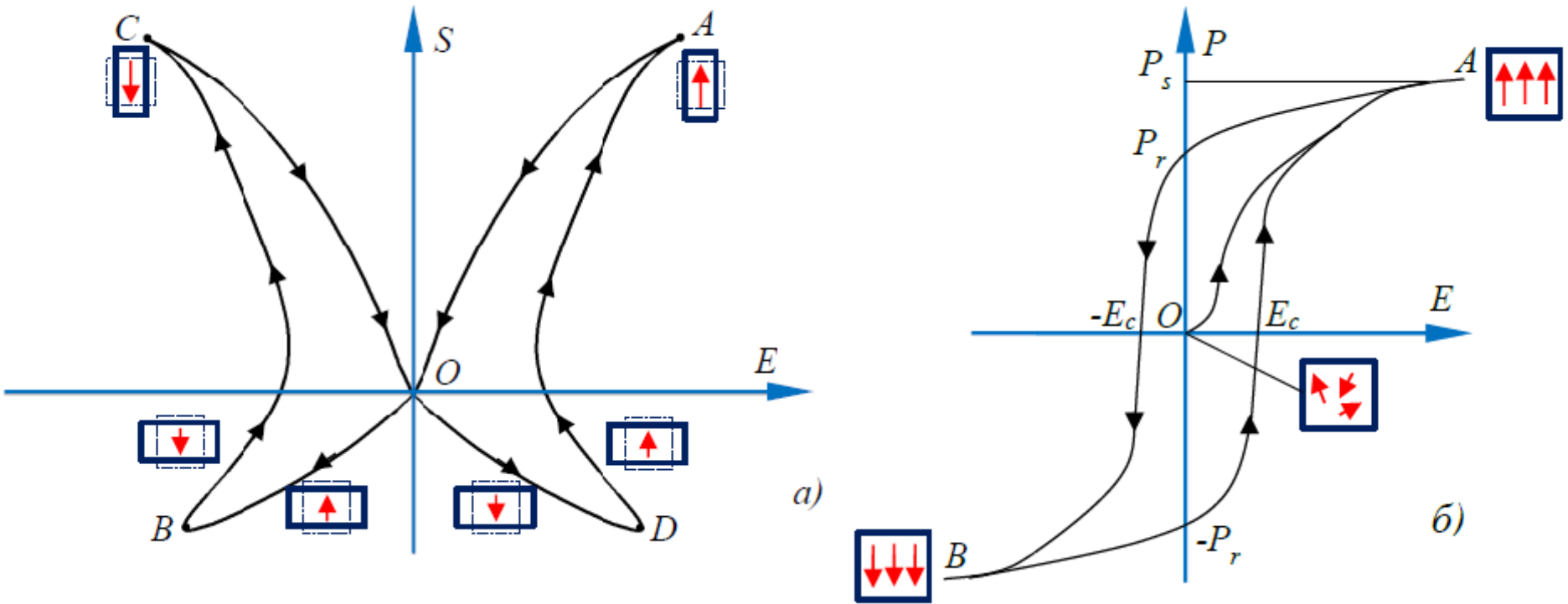
# Пиезоелектрични актуатори

Пиезоелектричните актуатори се характеризират:

- суб-нанометрична разделителна способност на преместванията
- възможности за преодоляване на натоварвания от порядъка на тонове.
- широка амплитудно-честотна лента.
- високо бързодействие от порядъка на микросекунди.
- работят в широк температурен диапазон - от абсолютната нула до 200 °C.
- не са източник на прах и други замърсители, което ги прави подходящи за чисти стаи.
- практически няма износване, защото са базирани на промяна на размерите на телата.
- не са зависими от магнитни полета.

Недостатък на тези актуатори е сравнително високото захранващо напрежение, достигащо до 1000V.

# Пьезоелектрични актуатори



Хистерезиси на пьезоелектрични актуатори: а) деформация-електричко поле; б) поляризация електричко поле

# *Пиезоелектрични актуатори*

Пиезоелектричните актуатори се подразделят на:

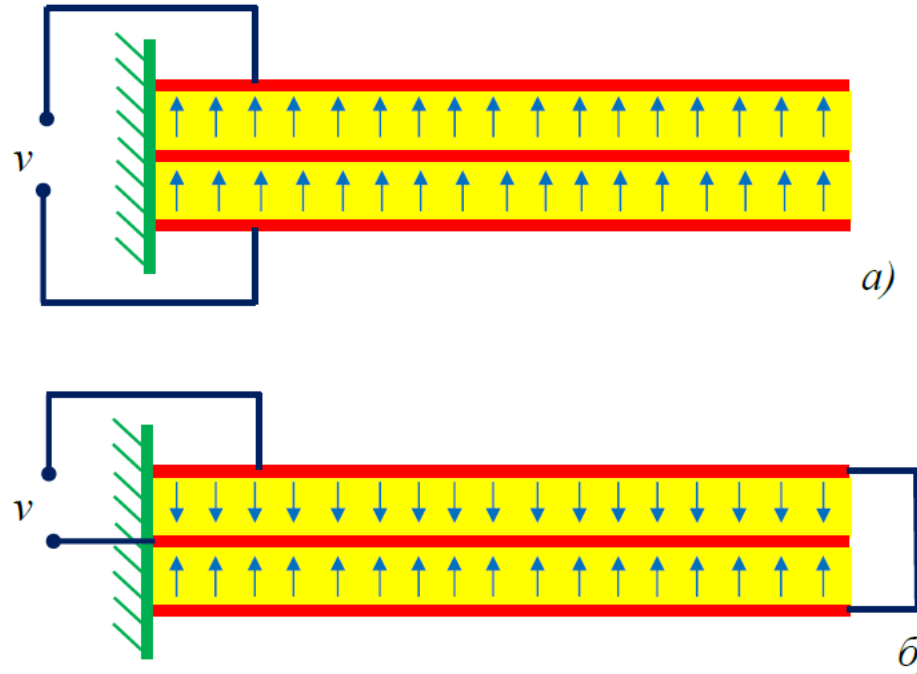
- **нерезонансни** – работят с честота под резонанса

- **резонансни** – работят в резонансна честота

# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Пиезоелектрични биморфи



а) електрическо захранване едната от керамиките да се удължи, а другата да се свие.

Електрически вериги на биморфи; а) последователна; б) успоредна

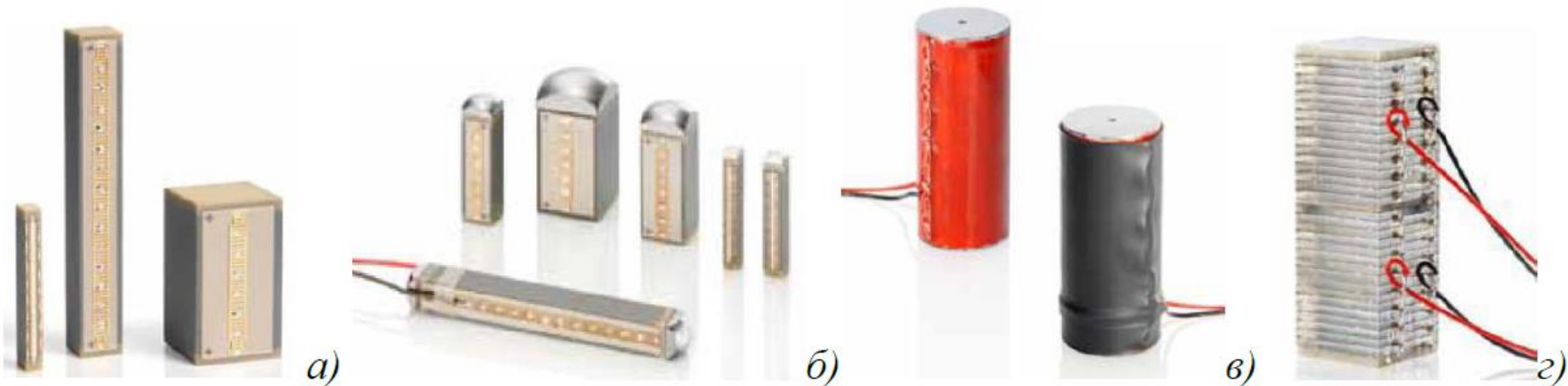
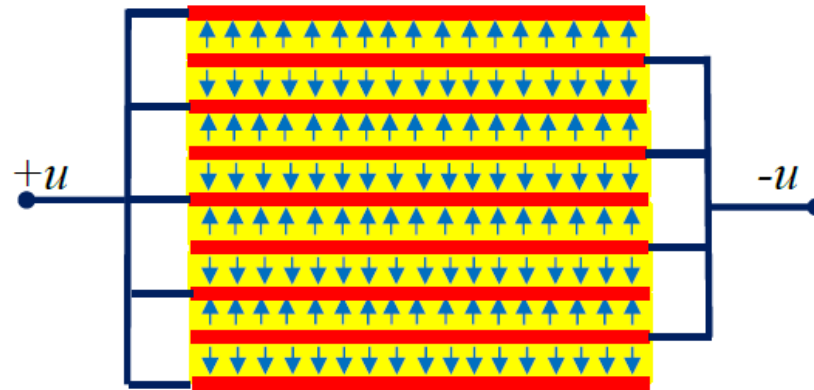
Голямо огъване и ниска генерирана сила.

В сравнение с директните задвижвания изискват по-ниски електрически напрежения

# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Стек актуатори



Пиезоелектрични стек актуатори на фирма PIC[26]: а) керамични високомощни актуатори; б) керамични високомощин актуатори със сферичен край; в) PISA стек пиезоелектрични актуатори; г) биполярен пикоактуатор

# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Стек актуатори

Таблица 1.2 Справочни данни за пиезоелектрични стек актуатори

Тип	Размери АхВхL или DхL mm	Номинално преместване $\mu\text{m}$ (0-100 V)	Макс. преместване $\mu\text{m}$ (0-120 V)	Блокираща сила N (0-120 V)	Коравина N/ $\mu\text{m}$	Електрически капацитет $\mu\text{F}$	Резонансна честота kHz
P-882.11	3 x 2 x 9	6.5 $\pm$ 20%	8 $\pm$ 20%	190	24	0,15	135
P-882.31	3 x 2 x 13.5	11 $\pm$ 20%	13 $\pm$ 20%	210	16	0.22	90
P-885.91	5 x 5 x 36	32 $\pm$ 10%	38 $\pm$ 10%	950	25	3.1	40
P-888.91	10 x 10 x 36	32 $\pm$ 10%	38 $\pm$ 10%	3800	100	13.0	40
P.885.95	11.2 x 40.5	30 $\pm$ 10%	36 $\pm$ 10%	900	25	3.1	35

Таблица 1.3 Справочни данни за PISA стек актуатори

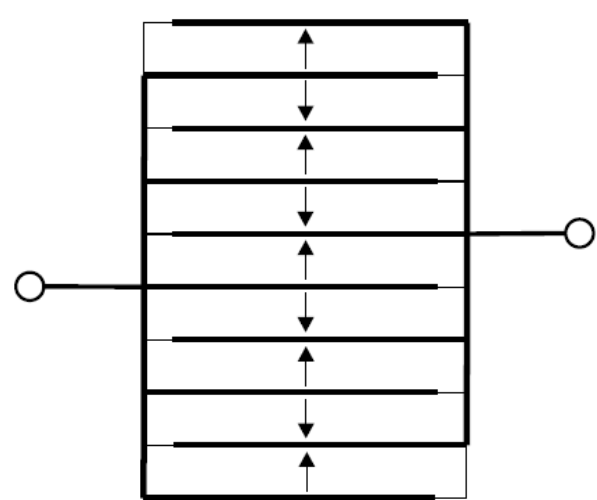
Тип	Размери DхL mm	Преместване $\mu\text{m}$ (0-1000 V)	Блокираща сила N (0-1000 V)	Коравина N/ $\mu\text{m}$	Електрически капацитет $\mu\text{F}$	Резонансна честота kHz
P-007.00	7 x 8	5	650	130	11	126
P-025.200	25 x 244	300	16000	54	8500	5
P-045.80	45 x 105	120	49000	410	11000	10
P-056.20	56 x 33	30	60000	2000	4300	32
P-056.90	56 x 154	180	78000	430	27000	7

За PISA стек актуаторите от Фиг. 1.13 в) ходът варира до 300  $\mu\text{m}$ , натоварването до 80 kN при висока надеждност над  $10^9$  цикъла. Освен това тези актуатори притежават микросекундно бързодействие, нанометрична разделителна способност. Захранващо напрежение при тези актуатори се изменя от 0 до 1000 V.



# Стек актуатор

$$\Delta l = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = n V d_{33}$$



Пиезоелектричните стек актуатории са направени от тънки пиезоелектрически пластини, наредени една върху друга. Между тях има общи електроди, които са свързани през един и образуват два електрически извода.

## Сравнителни показатели на продавани пиезоелектрични стекове

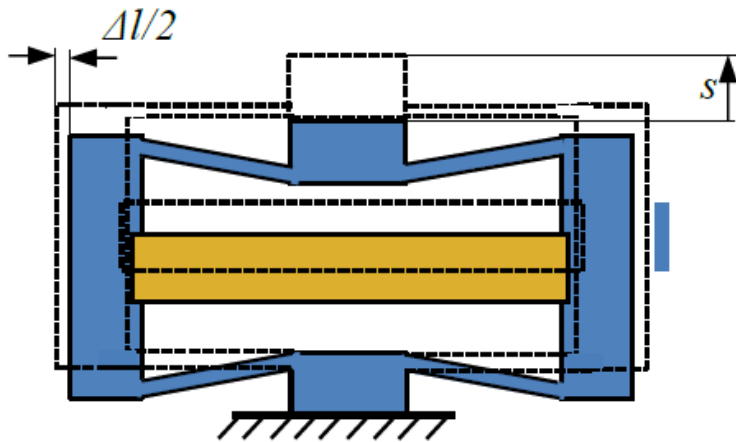
	Matroc 7111-03031	Matroc 7111-05051	Ferroperm Pz27-40x033	Ferroperm Pz29-27x067
Dimensions, mm	3.5 × 3.5 × 3.5	5 × 5 × 3.5	6.8 × 4.7 × 1.7	6.7 × 4.6 × 2.2
Capacitance, nF	70	120	–	–
Voltage, V	+150 – –20	+150 – –20	100	200
Maximum stroke, μm	2	2.8	1.6	3.3
Maximum force, N	425	850	–	–
Maximum Temperature, C	<75	<75	<250	<150

# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Стек актуатори с еластични усилватели

Стек актуаторът се разполага симетрично в затворена предварително напрегната метална рамка, която го натоварва само осево. По този начин се предотвратява и нежелано натоварване на огъване, което може да разруши крехката пиезоелектрична керамика. Когато стек актуаторът се удължава перпендикулярно на оста му се получава усилване на механичния ход. С помощта на Фиг. б) е изразена връзката между началния ъгъл  $\alpha$  и деформацията на стека



а)

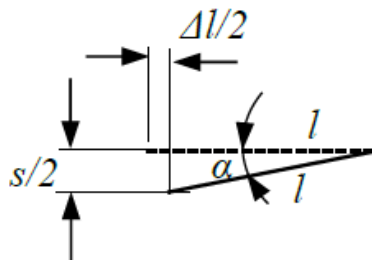
$$\Delta l = 2l(1 - \cos \alpha)$$

$$s = 2l \sin \alpha$$

$$s = \Delta l \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

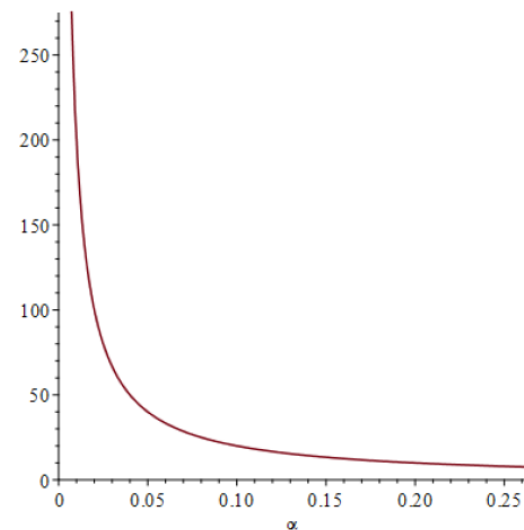
Коефициента на усилване е

$$k_{sp} = \frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}$$



б)

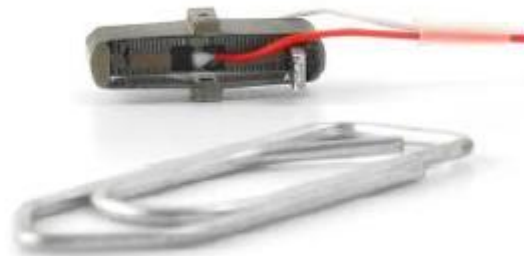
Постига се ход от около 1 mm  
Влокираща сила от порядъка  
на 700 N при захванващо  
напрежение е от -20 до 150 V  
[29].



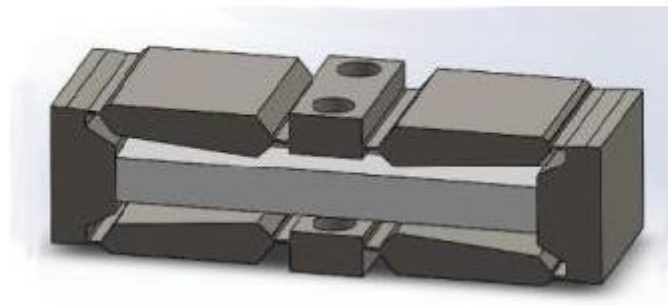
# *Пиезоелектрични актуатори*

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

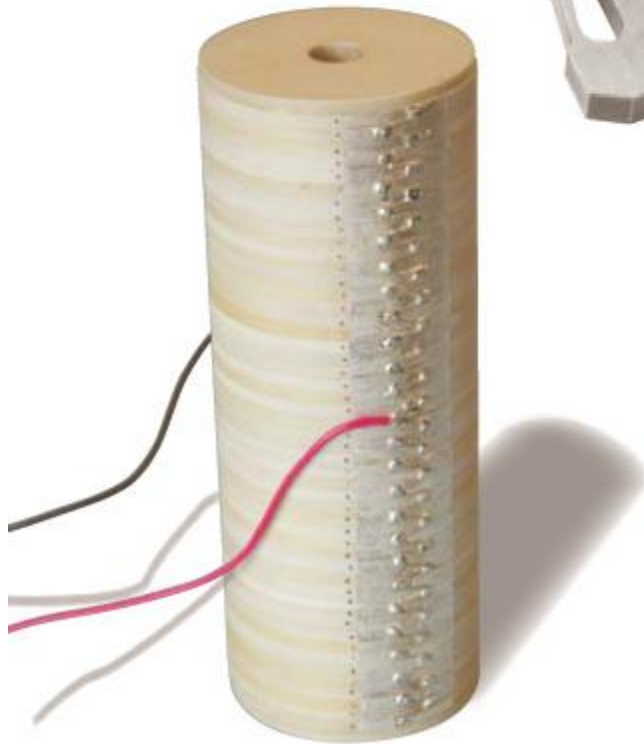
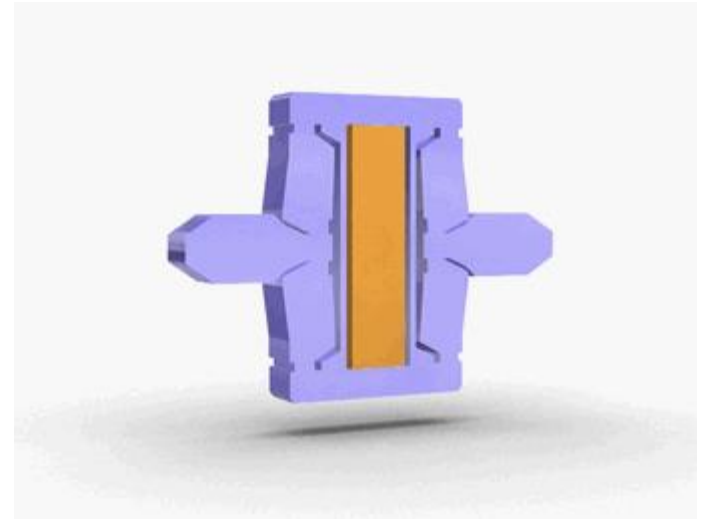
### Стек актуатори с еластични усилватели



Миниатюрен актуатор тип  
APA150XXS[29];



Актуатор на фирма PiezoDrive[30].



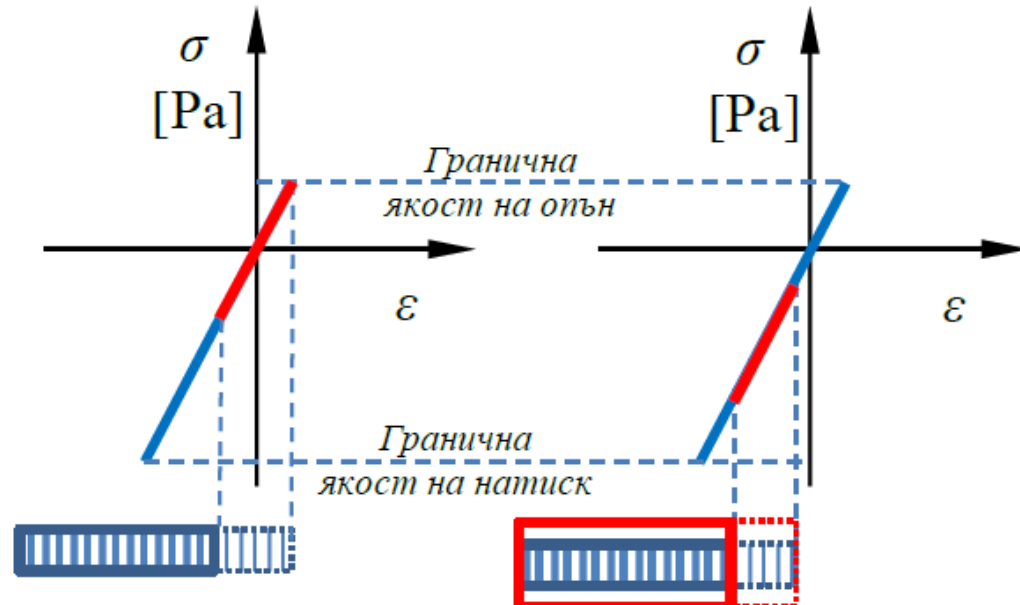
3.1.2019  
Sample piezoelectric actuators. Courtesy of Noliac

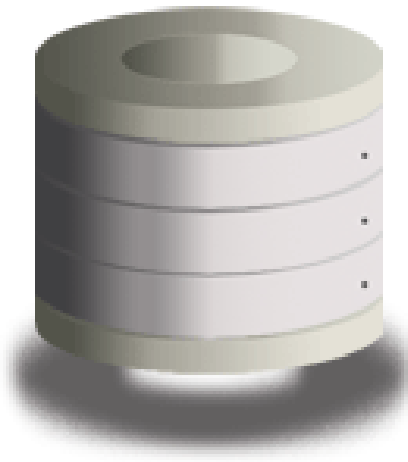
# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Предварително напрегнати стек актуатори

Чрез специални еластични рамки (Фиг. ) се създава предварително осево натоварване на стек актуатори, за да се измести знака на напрежението на керамиката от опън към натиск. Така чрез предварителното натоварване, пиезоелектричната керамика може да поеме по-високи напрежения на натиск за сметка на напреженията на опън и да се разшири динамичния диапазон на актуатора. Същия ефект се използва и в пиезоелектричните актуатори с еластичен усилващ механизъм.



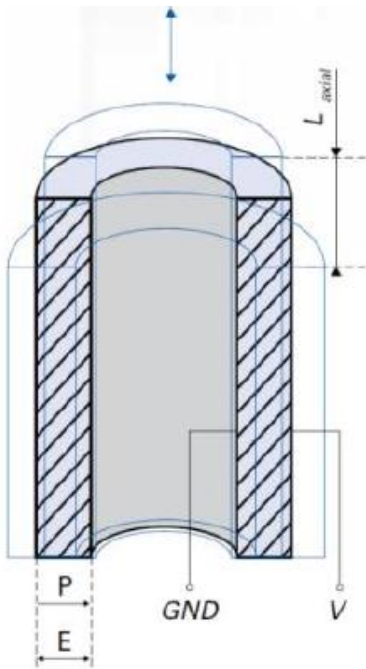


Sample piezoelectric actuators. Courtesy of Cedrat

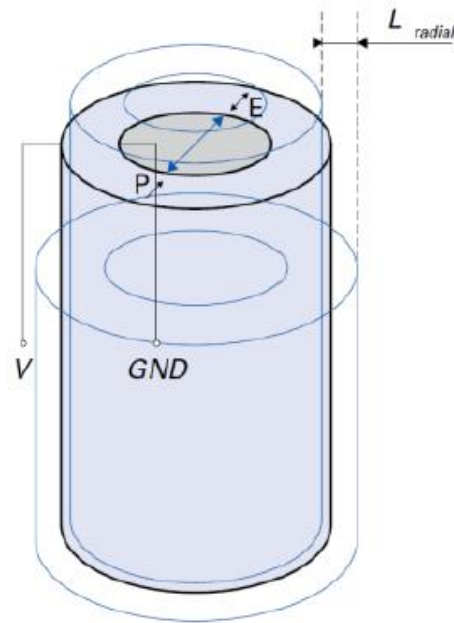
# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

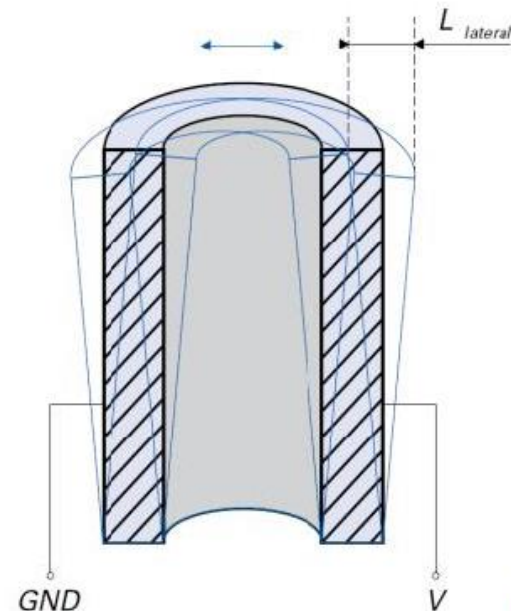
### Тръбни актуатори



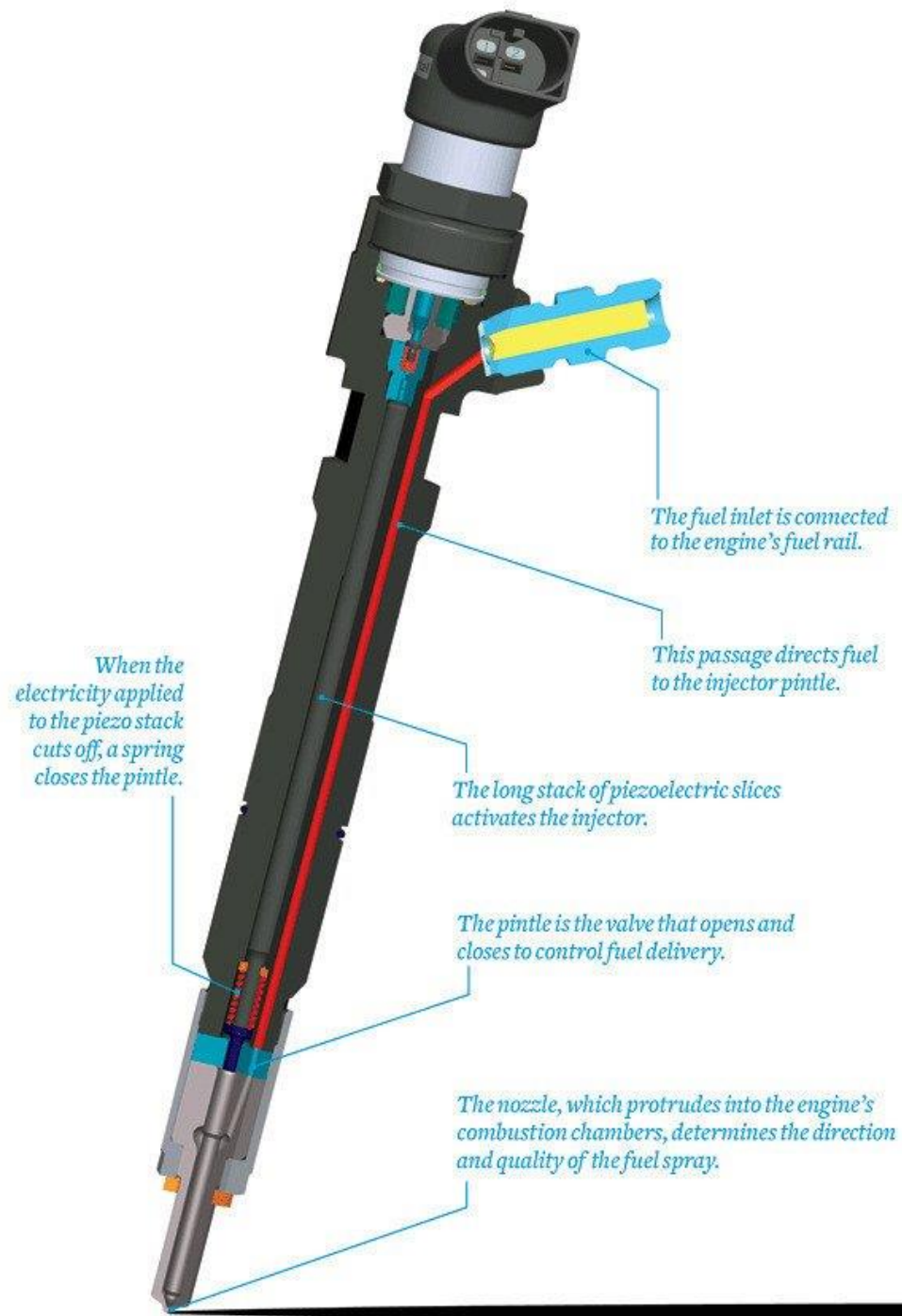
a)



б)



в)

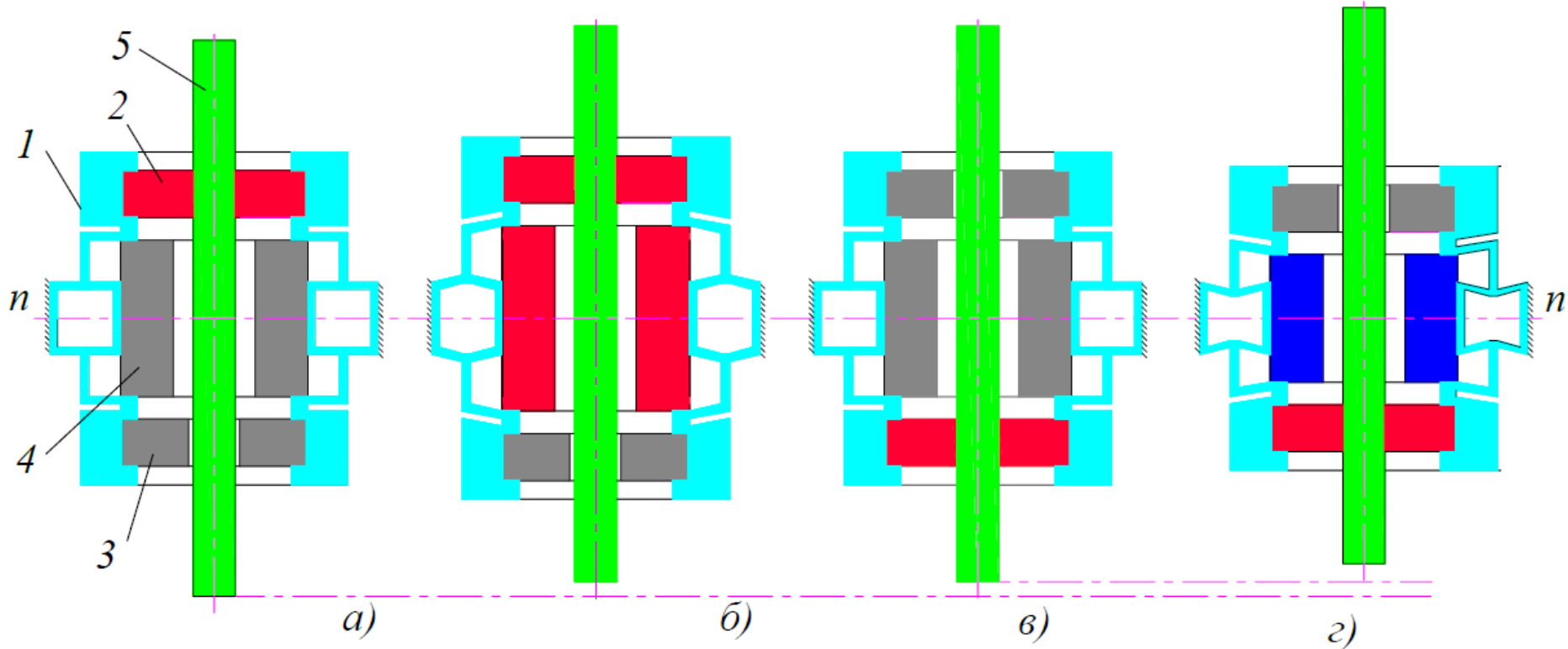




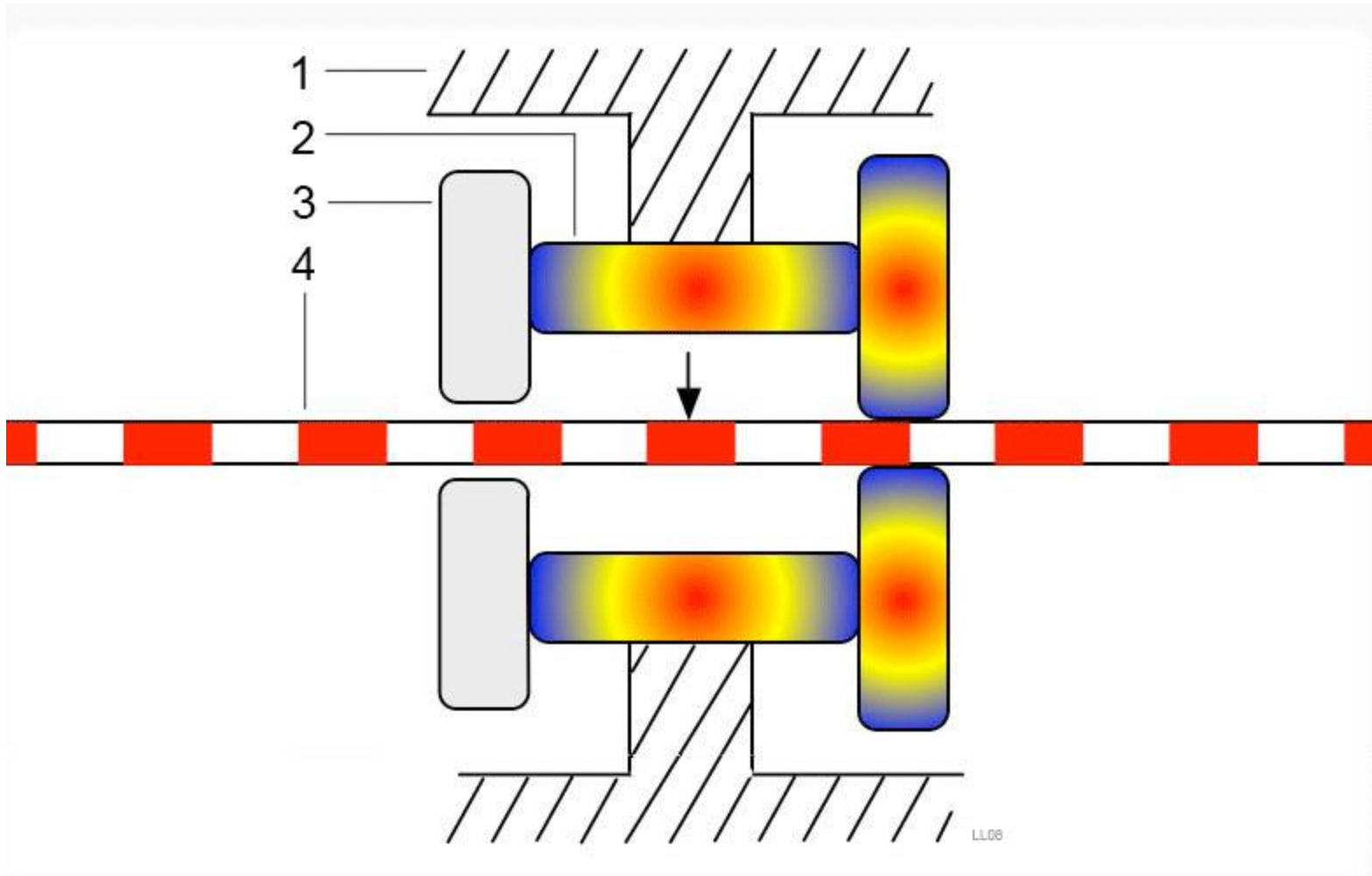
# Пиезоелектрични актуатори

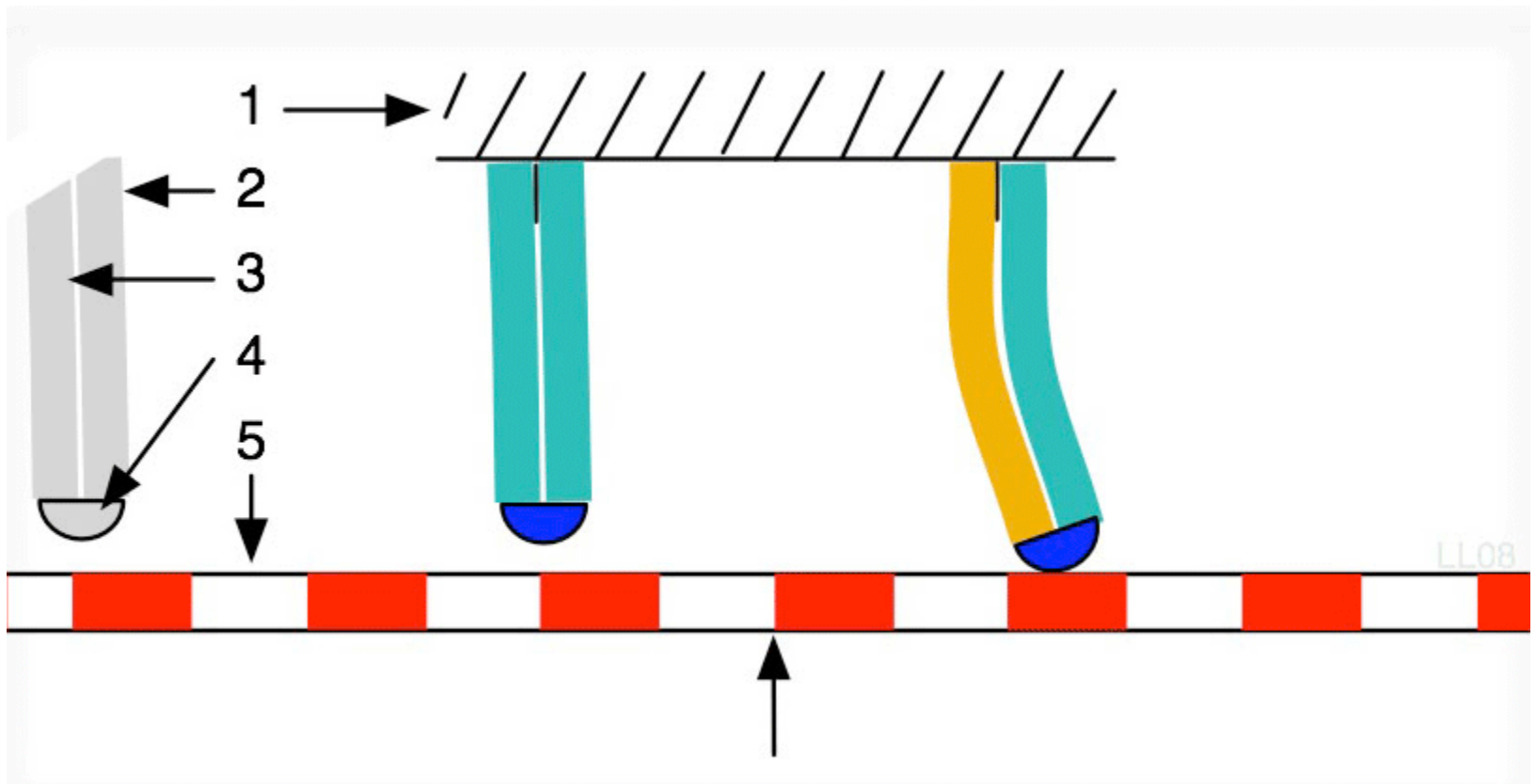
## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

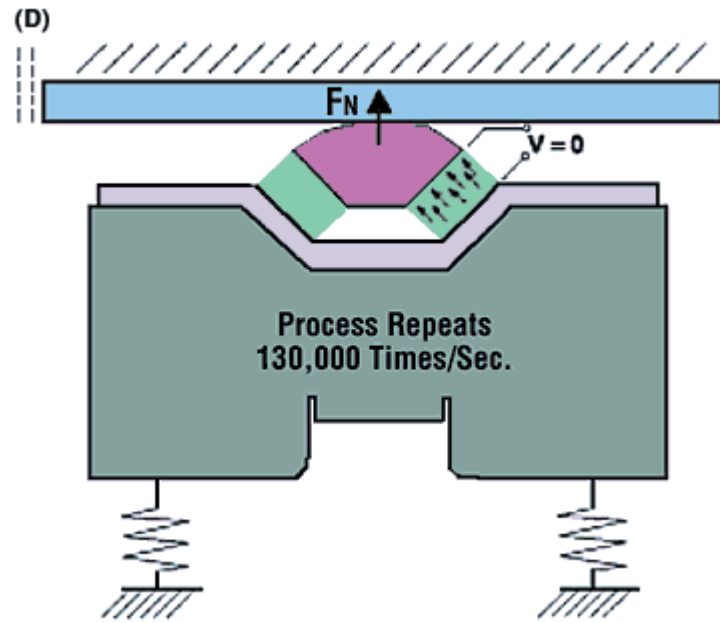
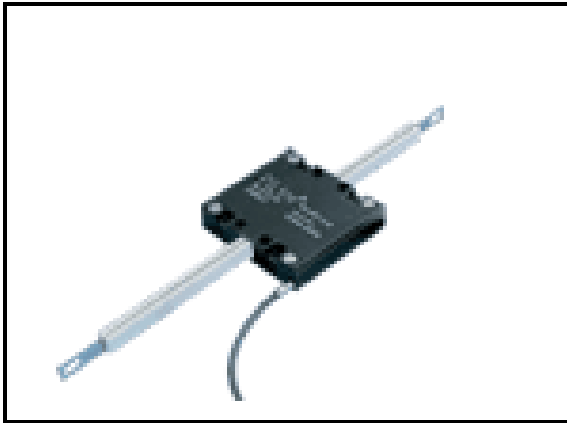
### Линеен инчуорм мотор съставен от тръбни актуатори



Стъпков линеен мотор инчуорм: а) втулка 1 захваща ротора; б) втулка 2 се удължава; в) втулка 1 и 2 се отпускат, а втулка 3 се стяга; г) втулка 2 се свива.



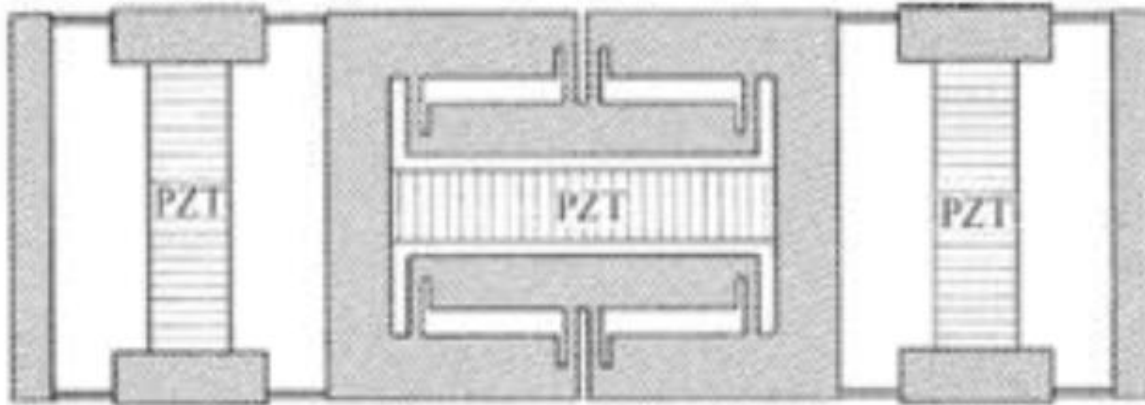




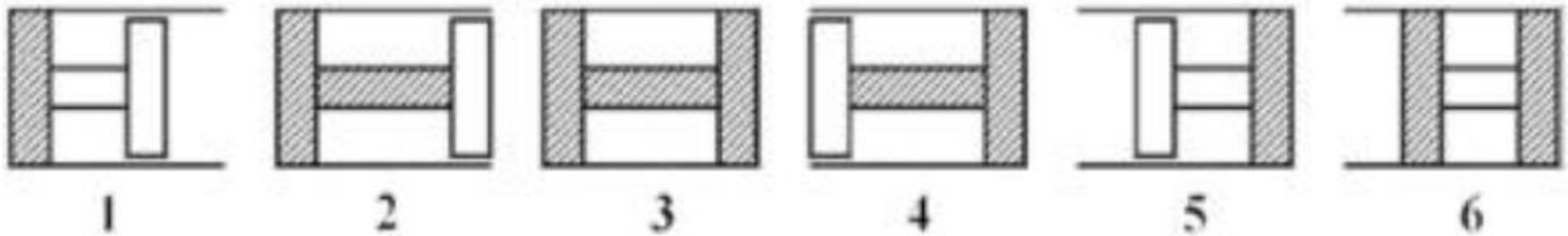
# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

### Линеен инчуорм мотор съставен от стек актуатори



a)



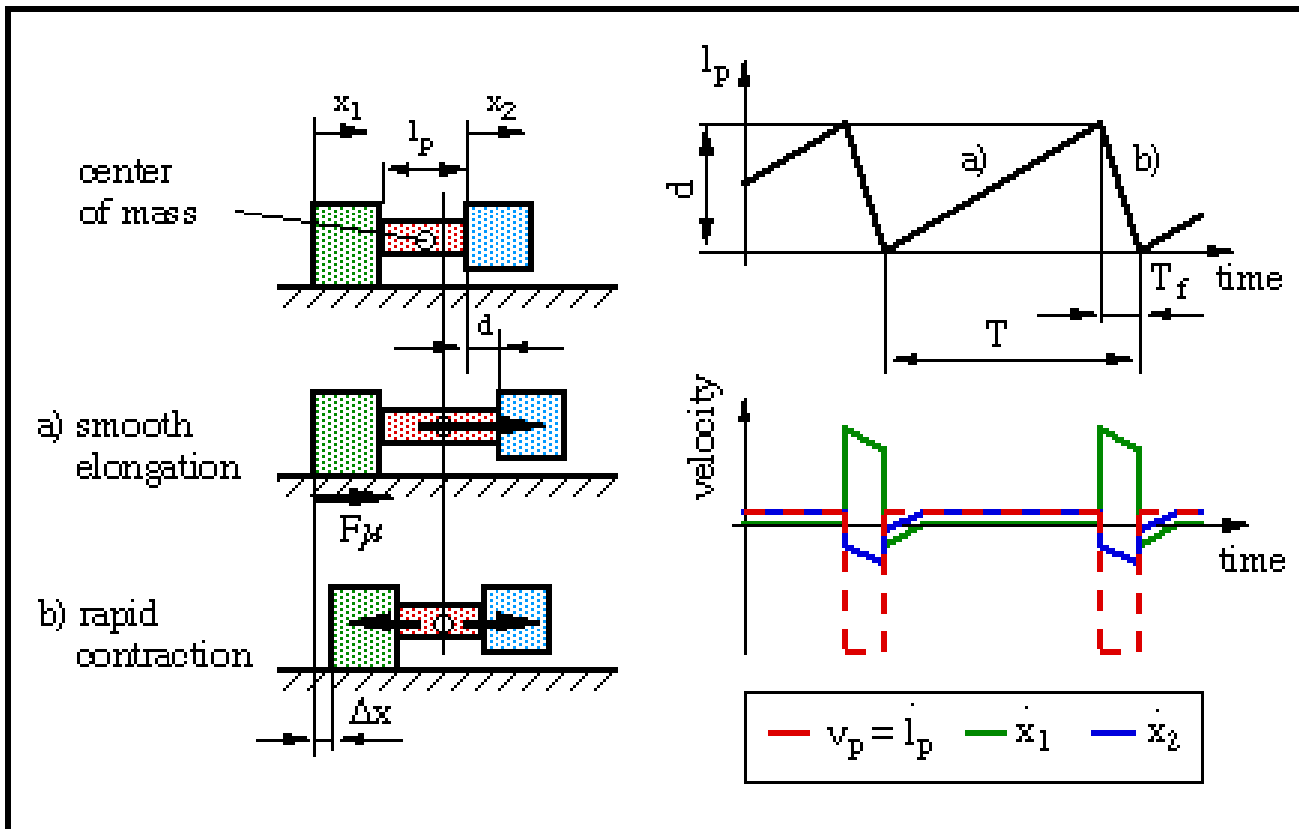
Посока на преместване  $\longrightarrow$

б)

# Пиезоелектрични актуатори

## Нерезонансни пиезоелектрични актуатори

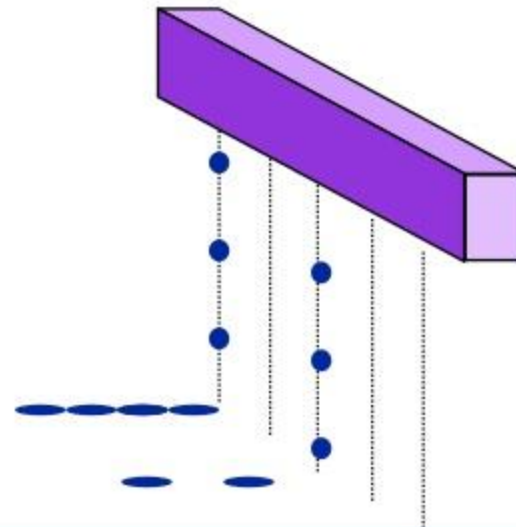
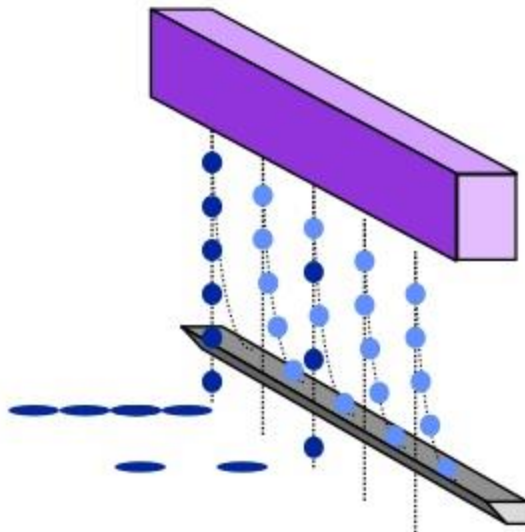
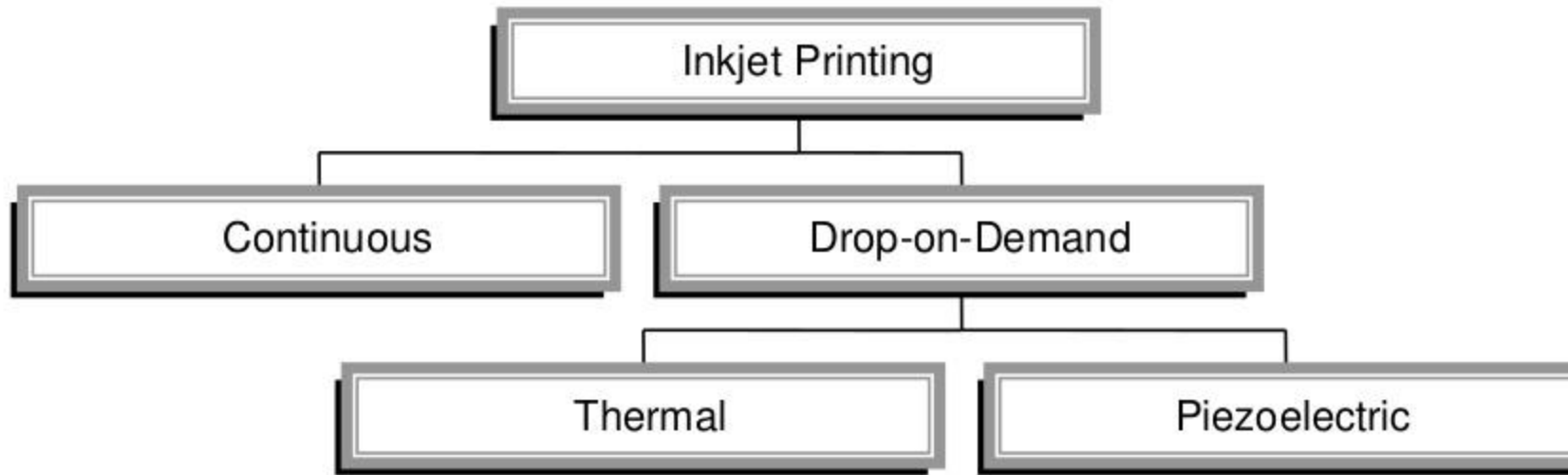
### Ударно задвижван линеен мотор (slip-stick actuator).

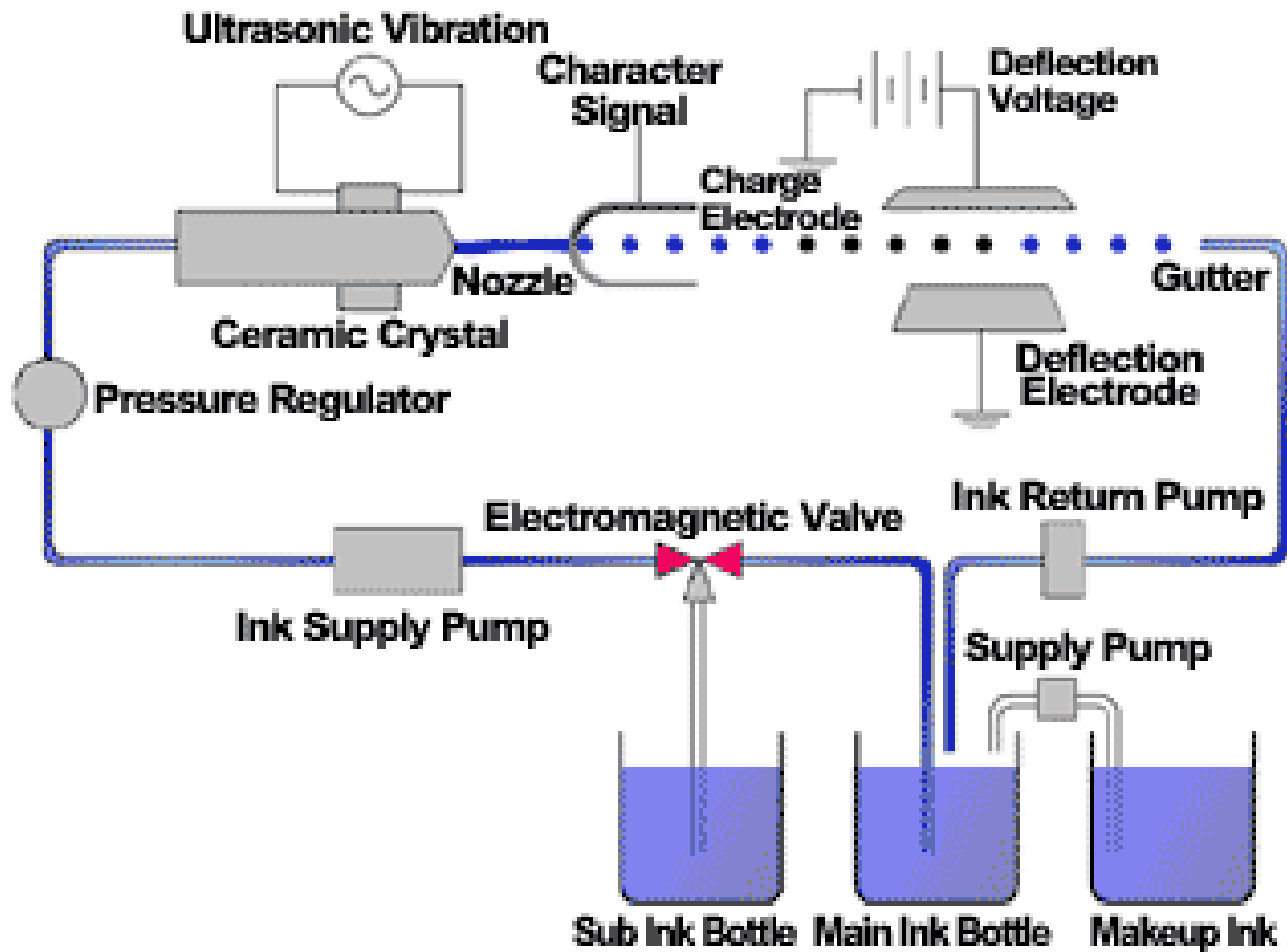


Ударно задвижван пиезоелектричен мотор: а) схема на мотора; б) позиции и скорости Higuchi[35].

# Inkjet Technologies

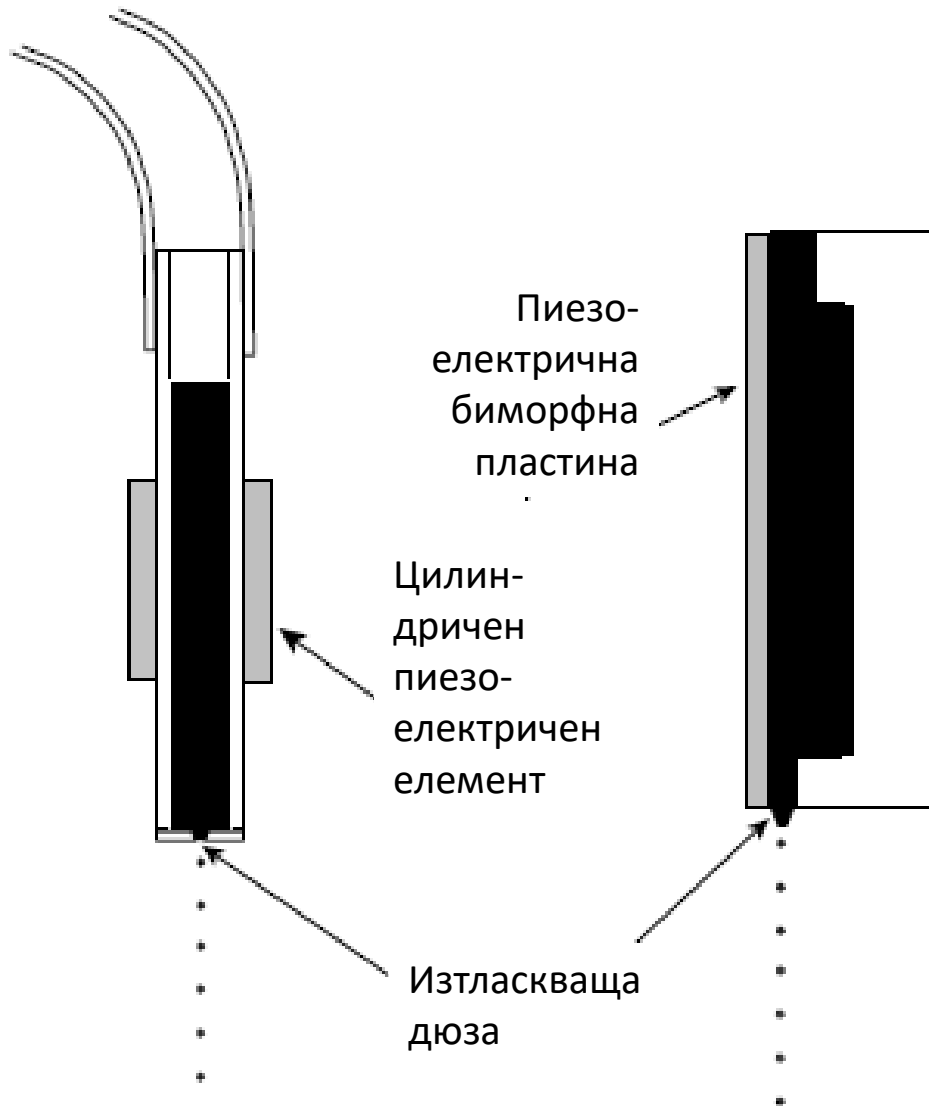
## Nozzle technology







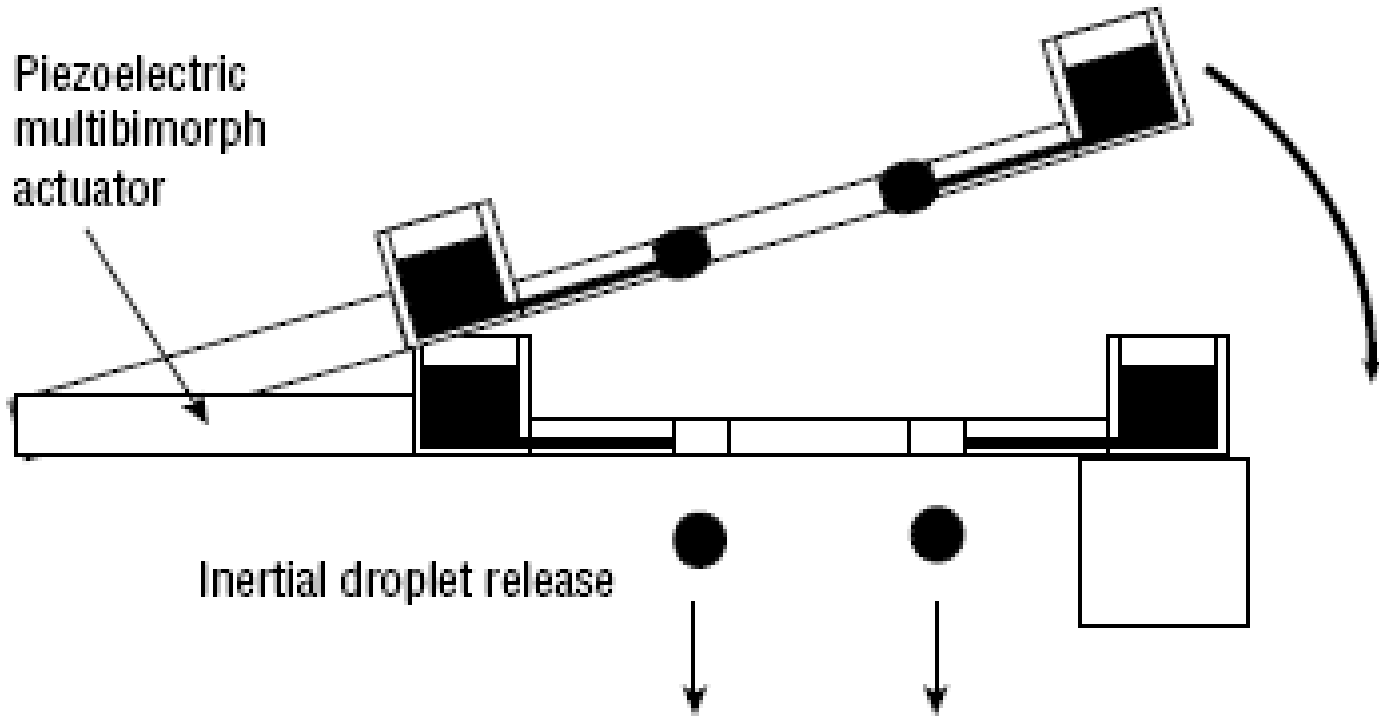
## Пиезоелектрични drop-on-demand микрокапкови изтласквачи (помпи)



Две разпространени задвижвания: изстискаващ тръбен резервоар на капков изтласквач; изтласквач с равнинна еластична пластина.

Тръбният дизайн е по-лесен за изработка, но равнинната конструкция го превъзхожда по отношение на миниатюризацията.

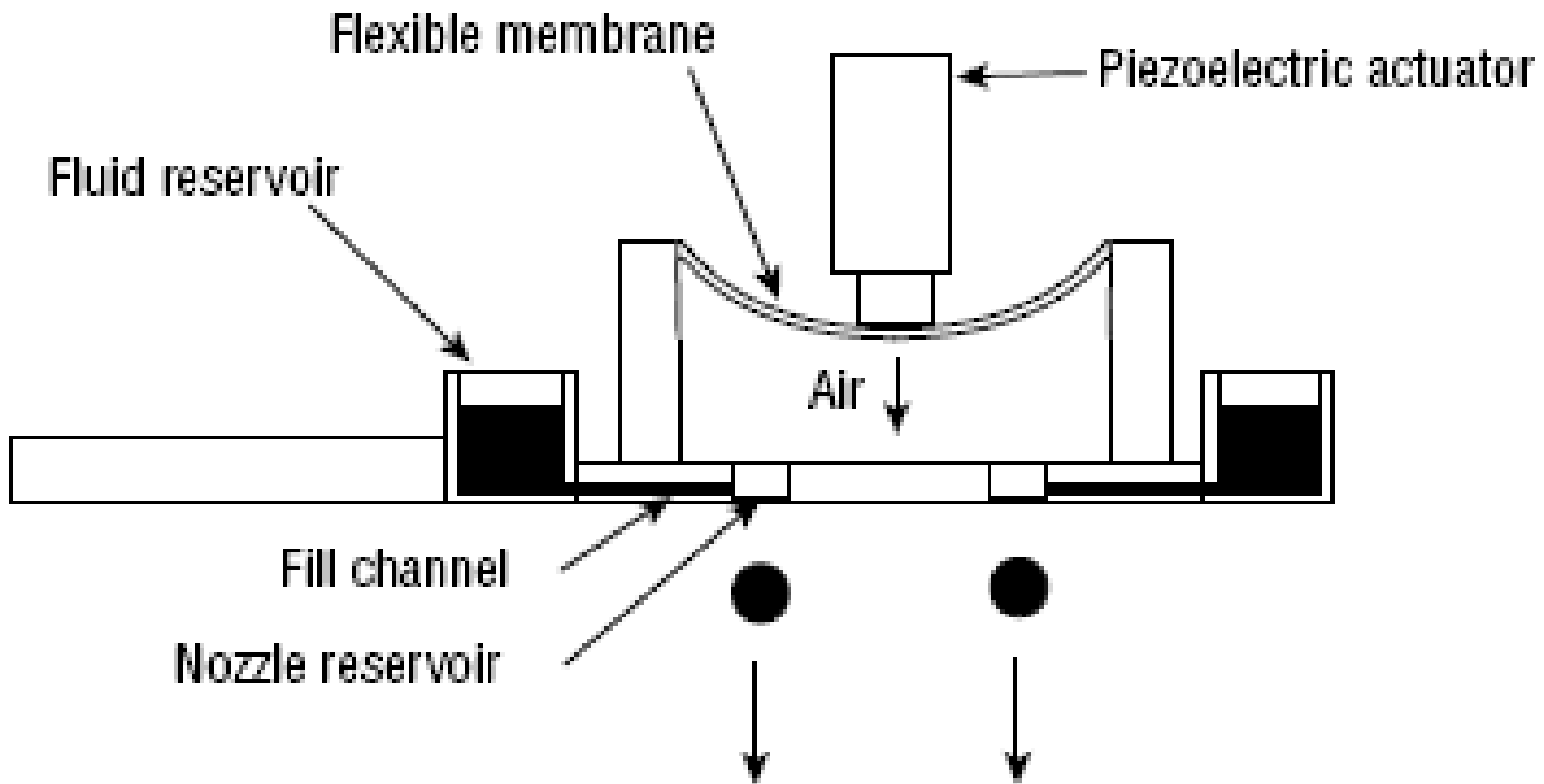
# TopSpot<sup>®</sup> метод за микрокапково генериране



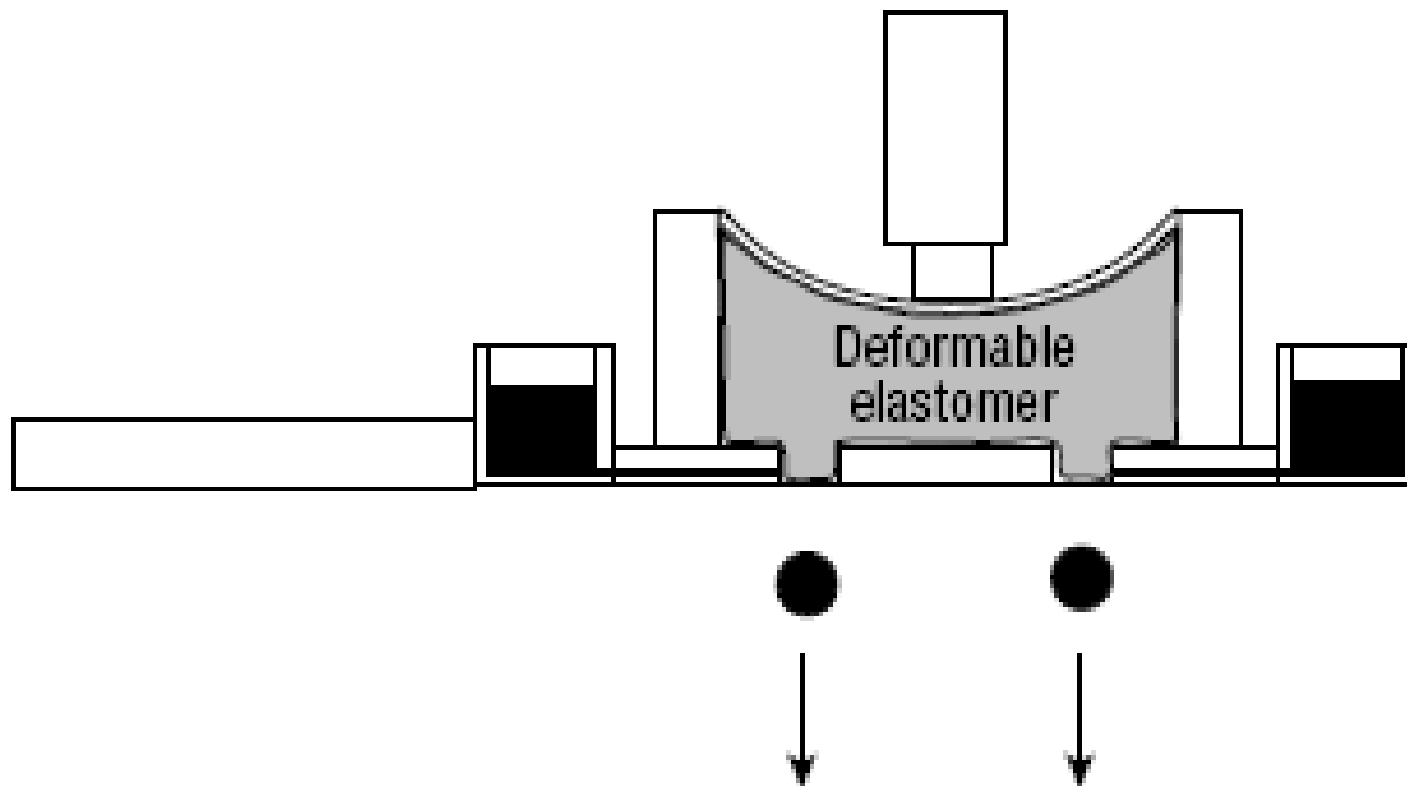
Микрокапковият генератор акумулира флуид посредством капилярни сили в микрорезервоари с дюзи и след това го изтласква рязко със сила.

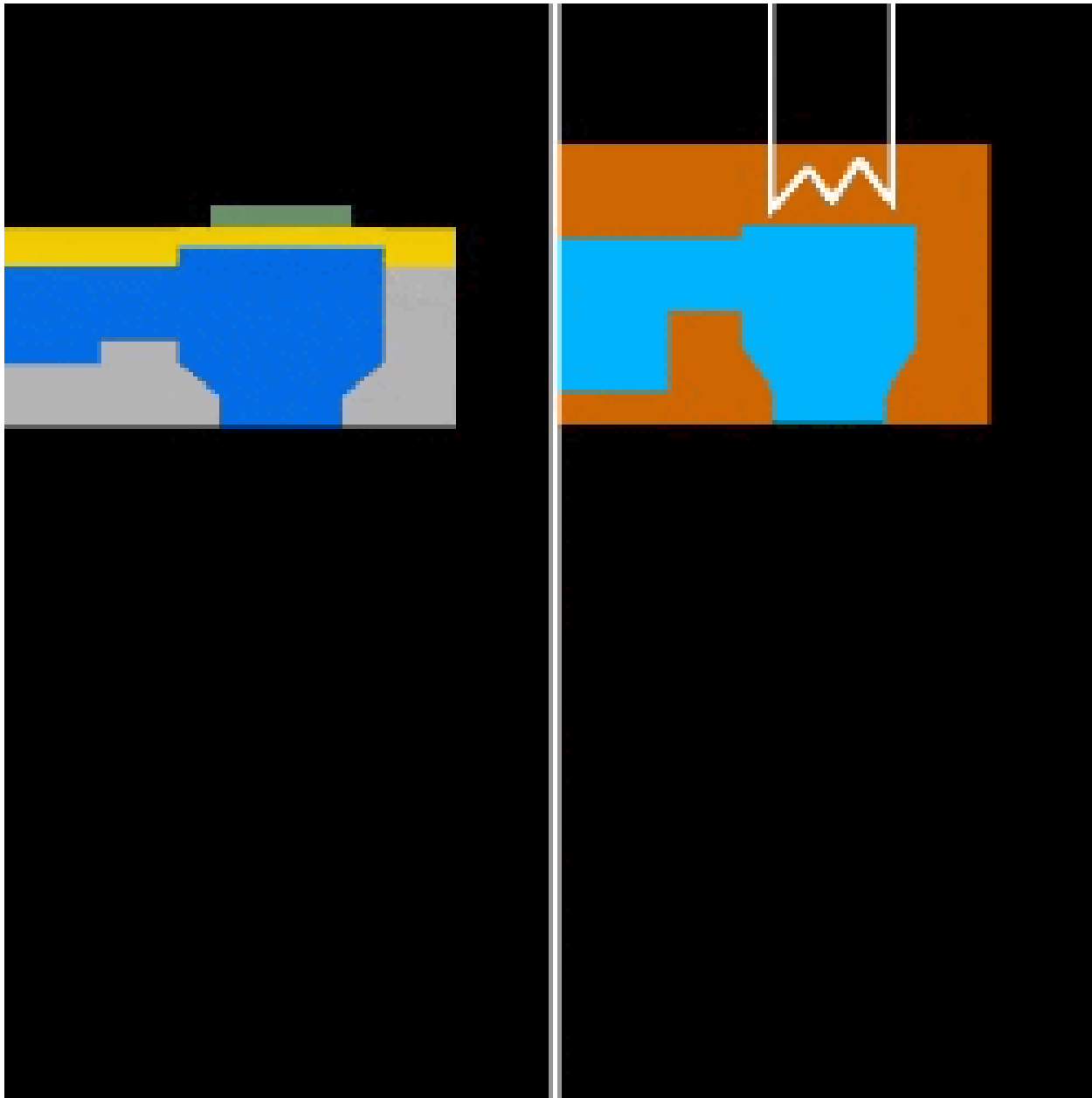
Методите за такова изтласкване са: инерционно изтласкване при което цялата конструкция се ускорява чрез пиезоелектричен лост;

(b) Пневматично изтласкване, при което обемът на въздуха над дюзите се свива чрез пиезоелектрично задвижване;



(с) Директно изместване на мастилото от резервоара чрез обемно оразмерен инертно-деформируем материал с еластични свойства (еластомер) задвижван пиезоелектрично.

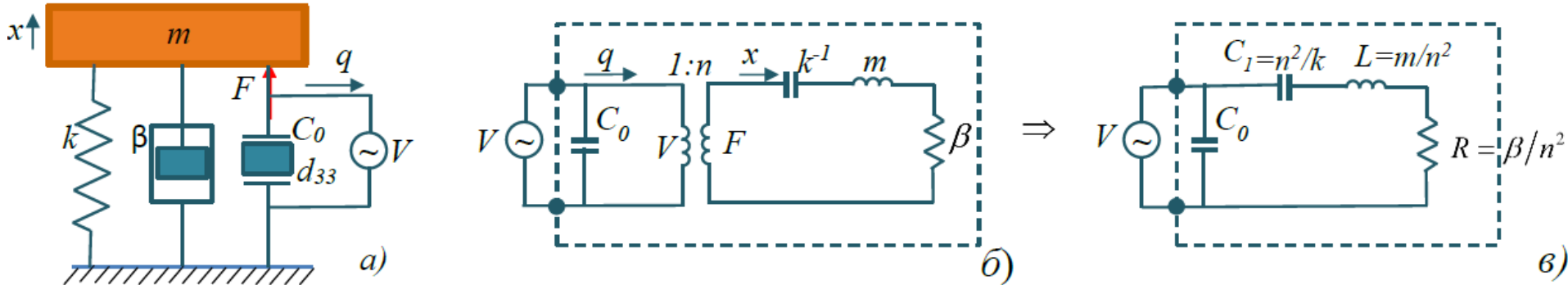




# Пиезоелектрични актуатори

## Резонансни пиезоелектрични актуатори

### Теория

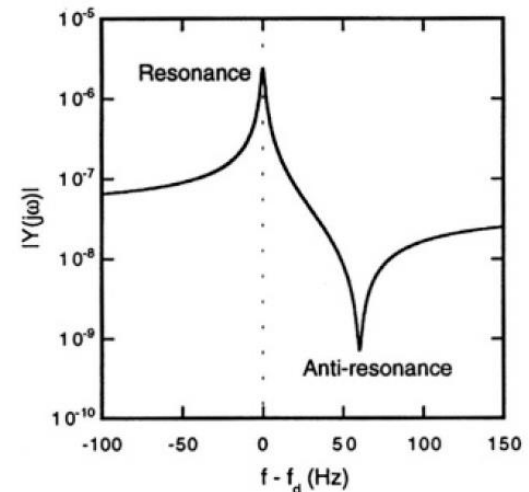


Модел на резонансен пиезоелектричен актуатор; а) механичен модел; б) еквивалентен електрически модел; в) преобразуван електрически модел

Комплексна проводимост (адмитанс)

$$Y(j\omega) = j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C_1}}$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \quad f_a = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_1 + C_0}{LC_1 C_0}} \quad Q \approx \frac{\sqrt{L/C_1}}{R}$$



В резонансните пиезоелектрични актуатори, за да се получи максимална изходяща мощност, възбуждащата честота се настройва да е равна на резонансната или антирезонансната.

# Пиезоелектрични актуатори

## Резонансни пиезоелектрични актуатори

### Ултразвукови мотори с бягаща вълна

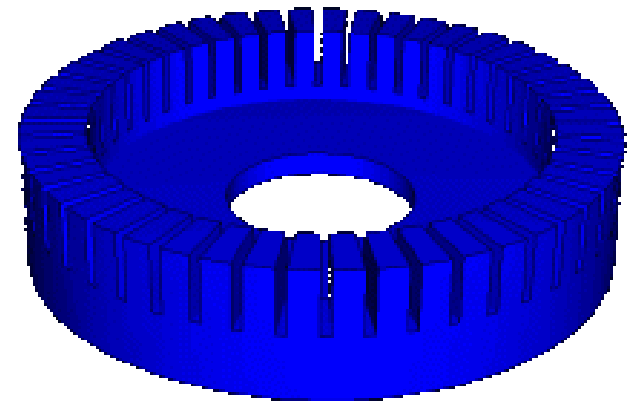
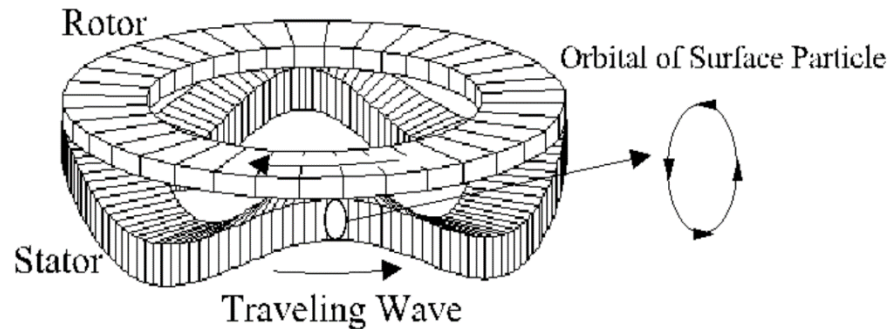
Стояща вълна

$$u(x, t) = A \cos kx \cos \omega t$$

Бягаща вълна

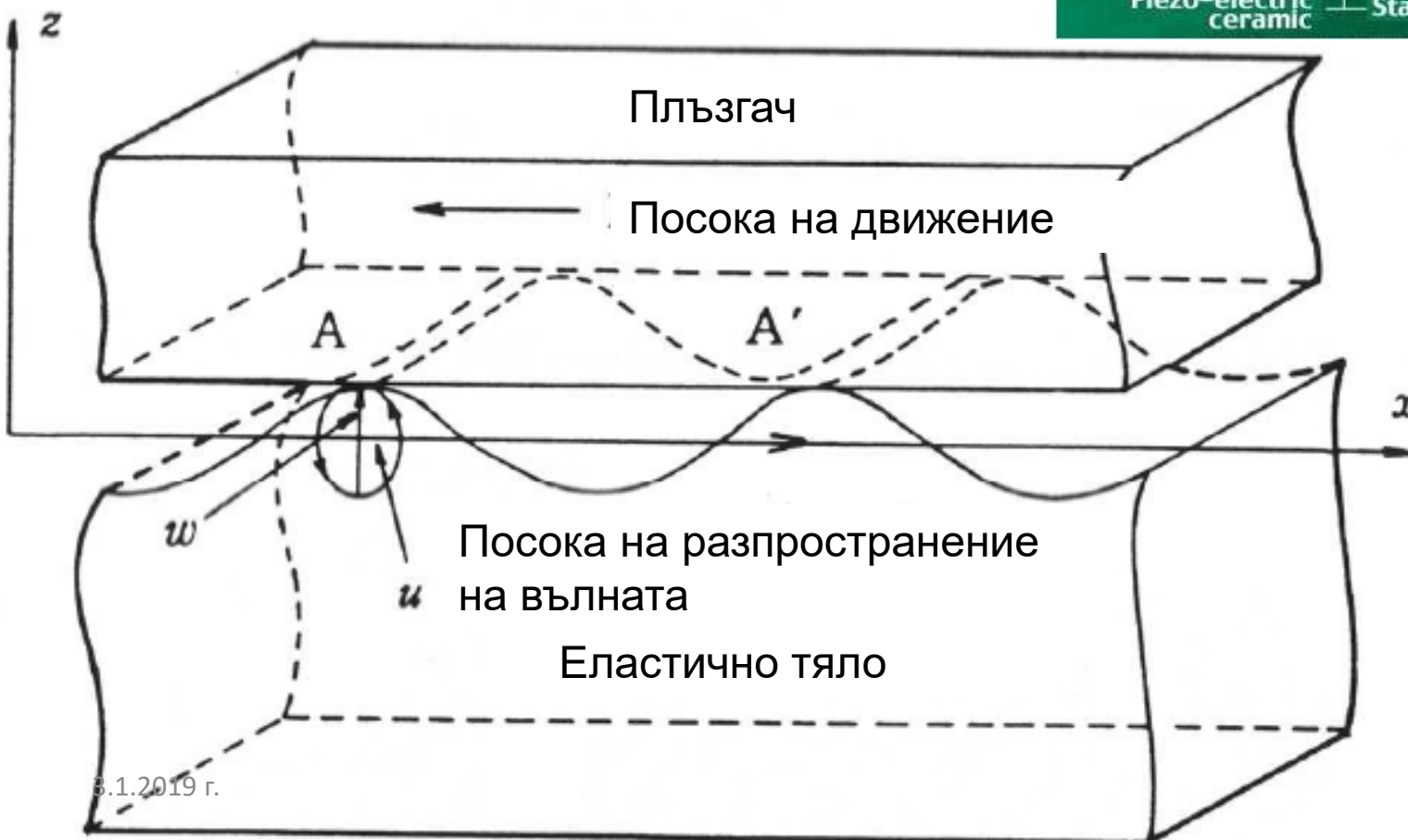
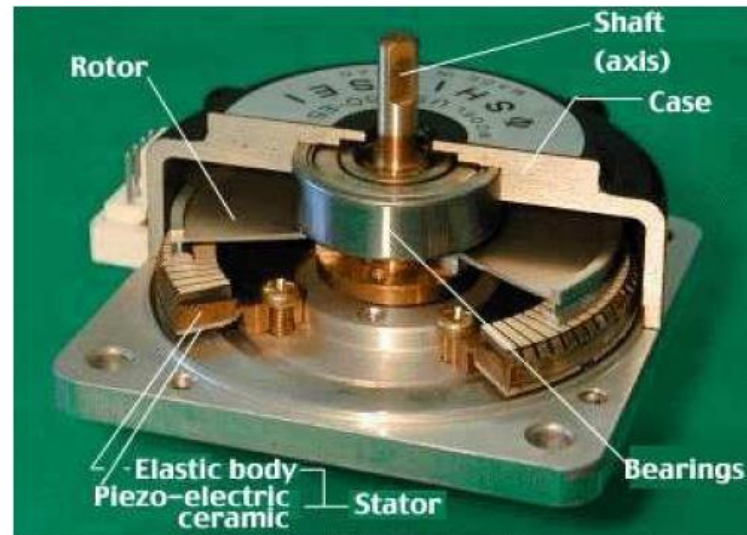
$$u(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad \longrightarrow \quad u(x, t) = A \cos(kx) \cos(\omega t) + A \cos(kx - \pi / 2) \cos(\omega t - \pi / 2)$$

*Бягащата вълна може да бъде генерирана чрез сумиране на две стоящи вълни, чиито фази се различават на  $90^\circ$  една от друга като във времето, така и в пространството. Съгласно този принцип, генерирането бягаща вълна в ограничен обем се осъществява чрез две стоящи вълни. Освен това се оказва, че в ограничените обеми може да се възбуждат стабилно само стоящи вълни.*



# Ултразвуков мотор с подвижна вълна

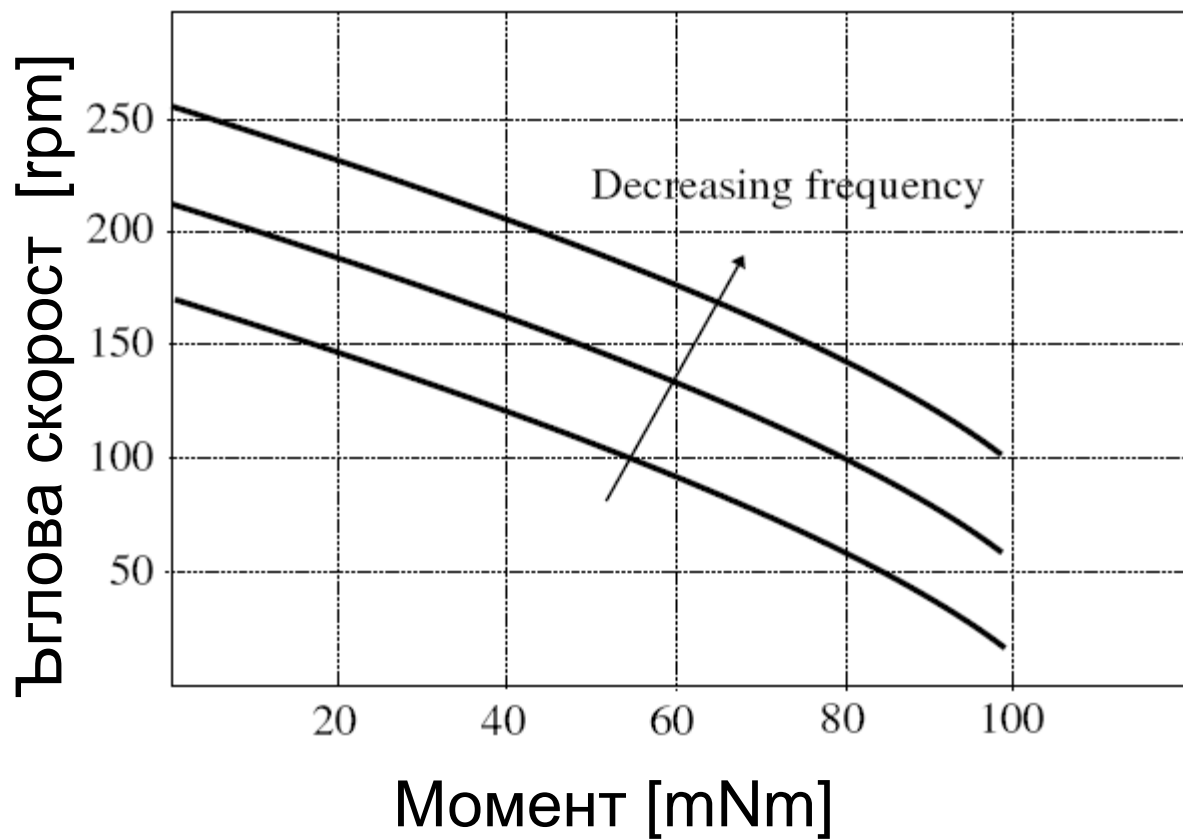
Travelling wave ultrasonic motor (TWUM)



Висок момент  
при ниска  
ъглова скорост  
проста  
конструкция и  
добро  
управление.



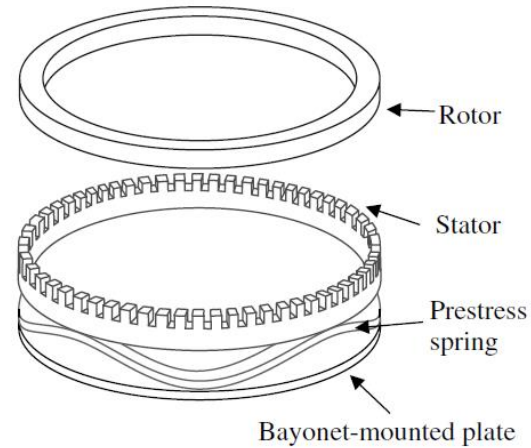
## Характеристики на вълнов ултразвуков мотор



# Пиезоелектрични актуатори

## Резонансни пиезоелектрични актуатори

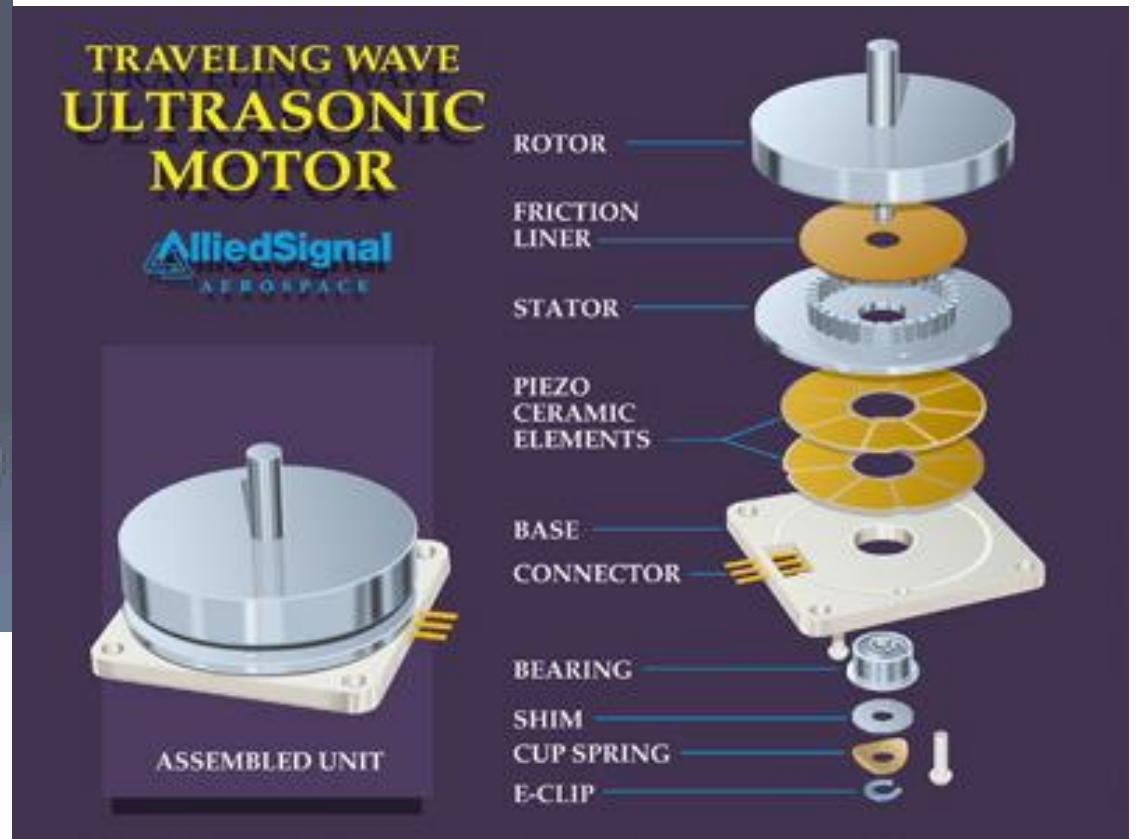
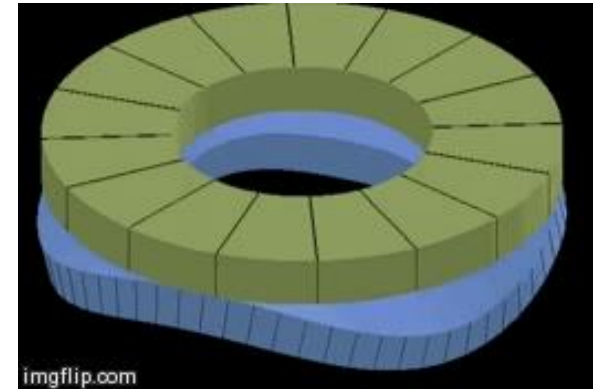
### Ултразвукови мотори с бягаща вълна



# Пиезоелектрични актуатори

Резонансни пиезоелектрични актуатори

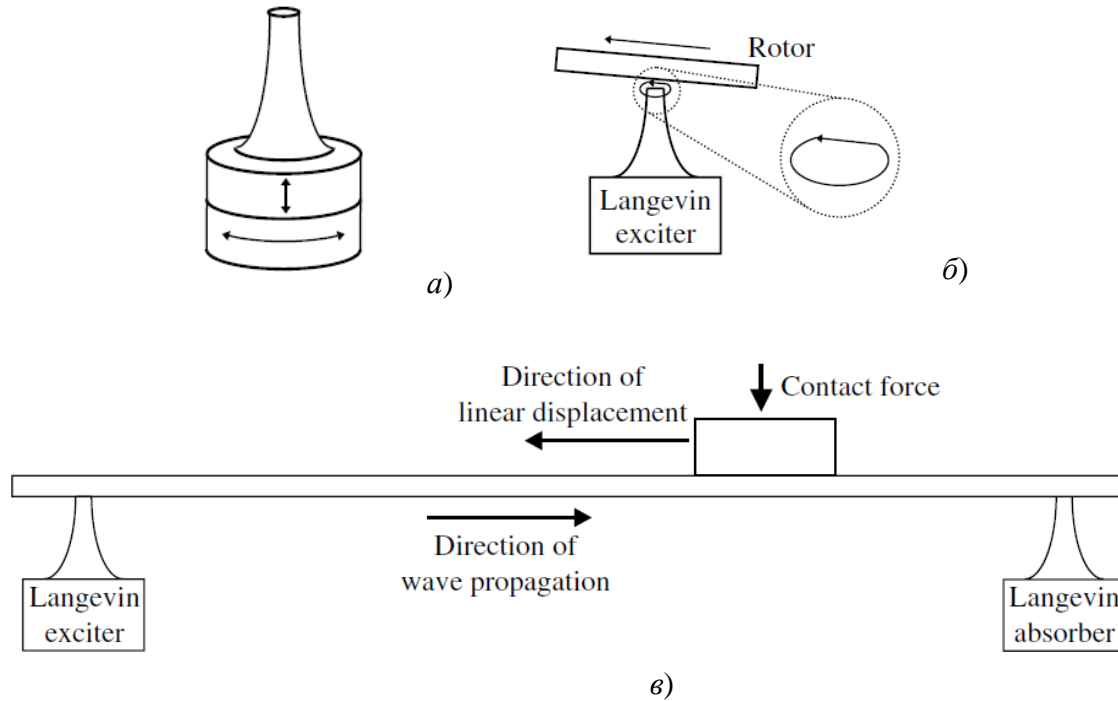
Ултразвукови мотори с бягаща вълна



# Пиезоелектрични актуатори

## Резонансни пиезоелектрични актуатори

### Линеен ултразвуков мотор с бягаща вълна



Линеен мотор с бягаща вълна: а) възбудител на Ланжеван; б) схема на мотора[28]

# Пиезоелектрични сензори

Според принципа действие пиезоелектричните сензори се класифицират на:

**-сензори за детекция на заряд** – директно се измерва количеството електричество натрупано вследствие на деформиране на кристала, чрез ускорение, удари и вибрации.

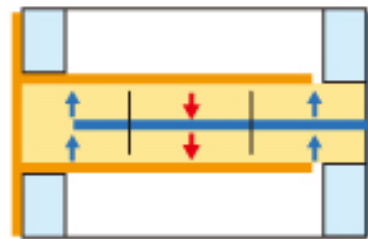
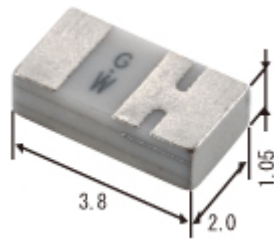
**-резонансни сензори** – сигналът за детекция е изменението на динамичните свойства на резонатор като например резонансна честота или Q-фактор.

**-ултразвукови вълнови сензори** – базира се на разпространяване на ултразвукова вълна, на която се измерва времето за преминаване, фазовото изместване на вълната или амплитудното ѝ затихване.

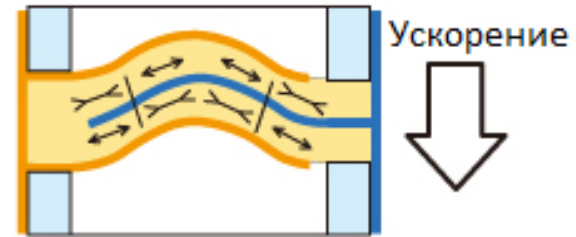
# Пиезоелектрични сензори

## Сензори за детекция на заряд

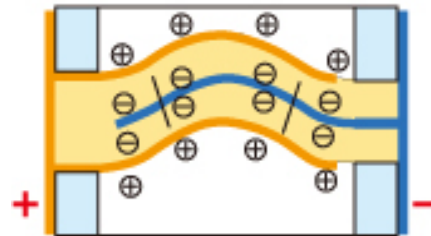
Сензор за удар [39]



а)



б)



б)

- ↑ ↓ Направление на поляризацията
- ↔ Направление на механичното напрежение
- ⊕ ⊖ Поляритет на електрическите заряди
- Електроди

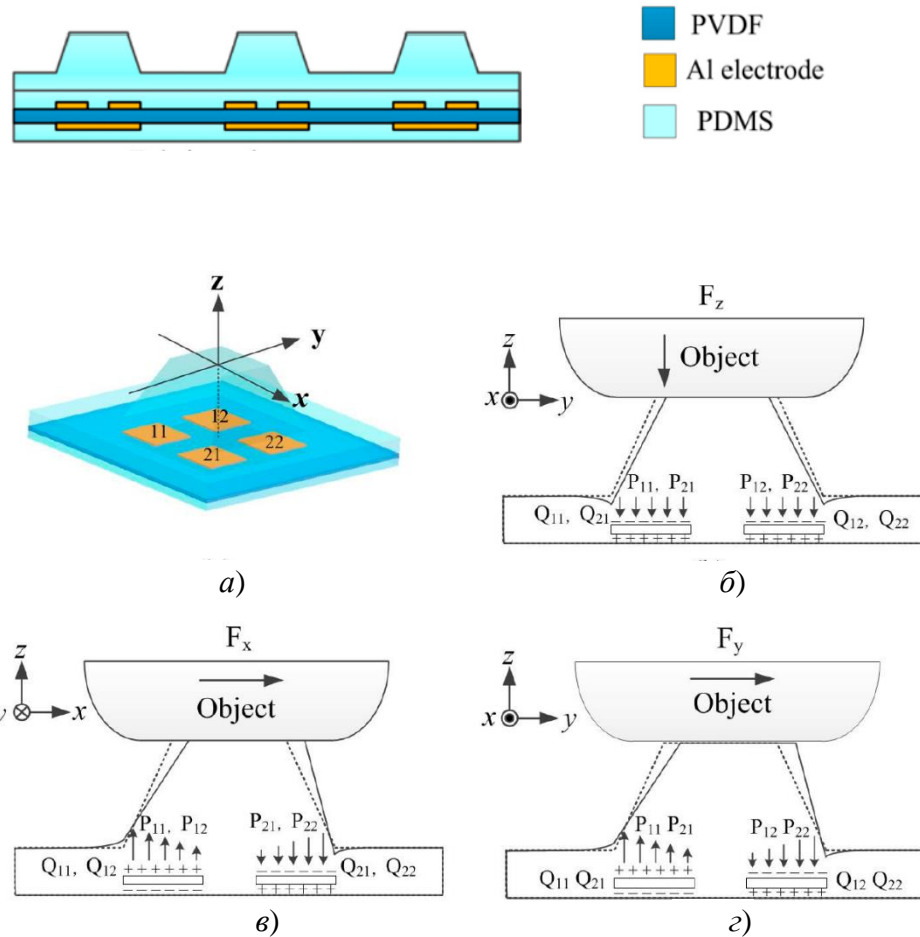
в)

Приложение на сензора за удар в крачкомер: а) върху сензора не действа ускорение; б) ускорението предизвиква механични напрежения; в) генерираните електрически заряди се преобразуват в електрическо напрежение; г) легенда [39]

# Пиезоелектрични сензори

## Сензори за детекция на заряд

### Масив от тактилни сензори

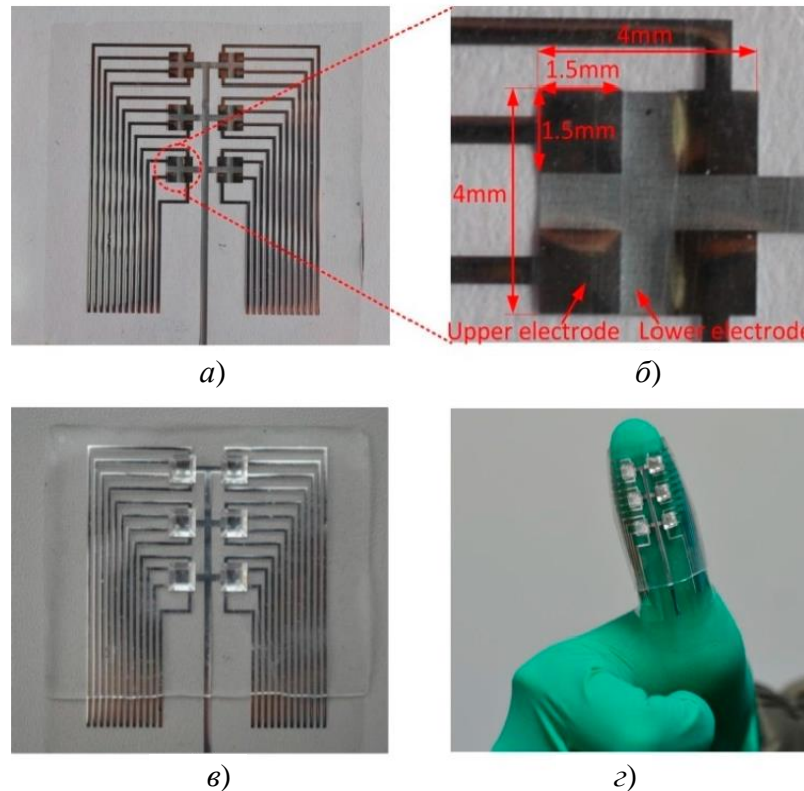


Принцип на действие на тактилния сензор: а) координатна система; б) генериране на сигнал при нормален натиск; в) сигнали на пиезоелектричните сензори при хоризонтална сила (натоварване на срязване) по ос  $x$ ; г) сигнали на сензорите при натоварване на срязване по ос  $y$ .

# Пиезоелектрични сензори

## Сензори за детекция на заряд

### Масив от тактилни сензори

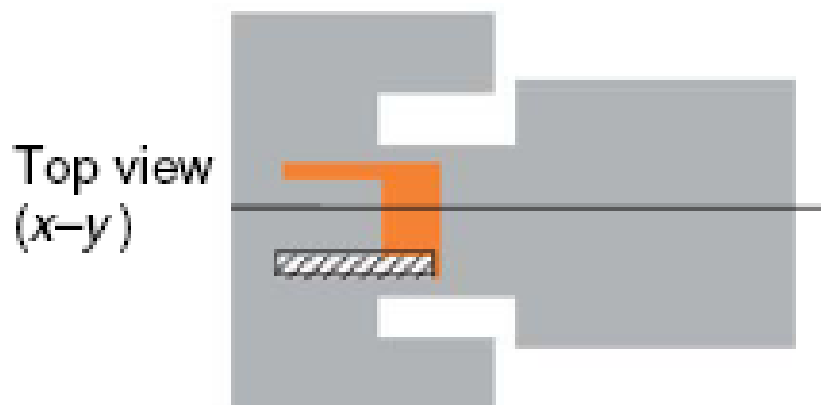


Масив от тактилни сензори: а) фотография на изработените сензори; б) увеличен изглед на един тактилен сензор; в) фотография на изработения масив от сензори; г) снимка на изработения сензорен масив, монтиран на крива повърхнина[40].



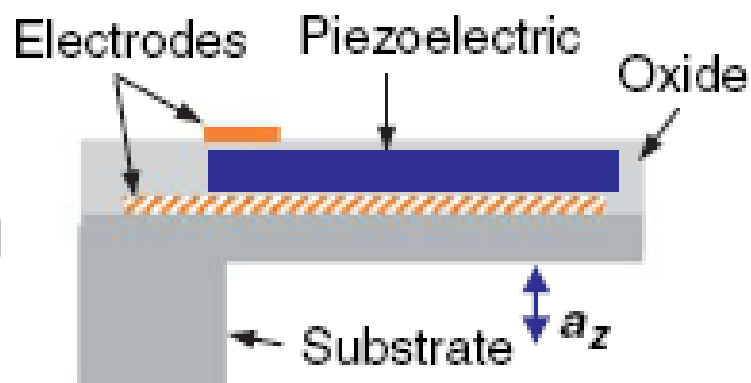
# ***z-осова пиезоелектрична структура на акселерометър***

(a)

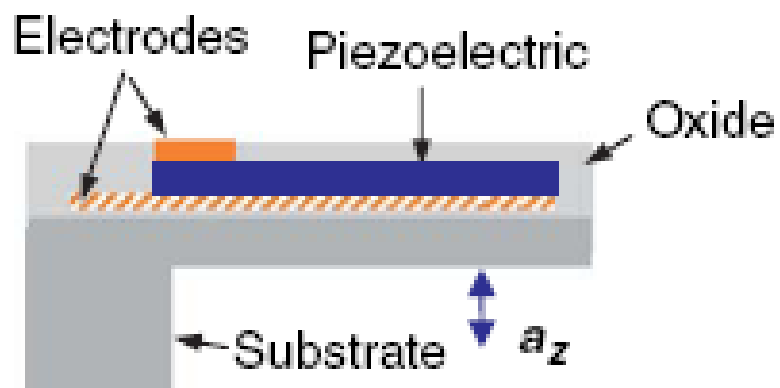


(b)

Cross-sectional view

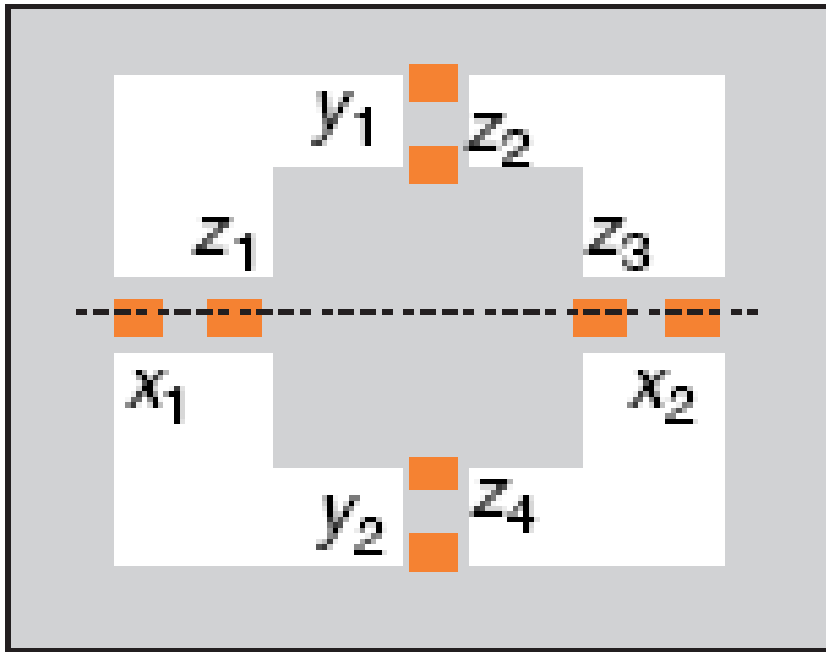


(c)

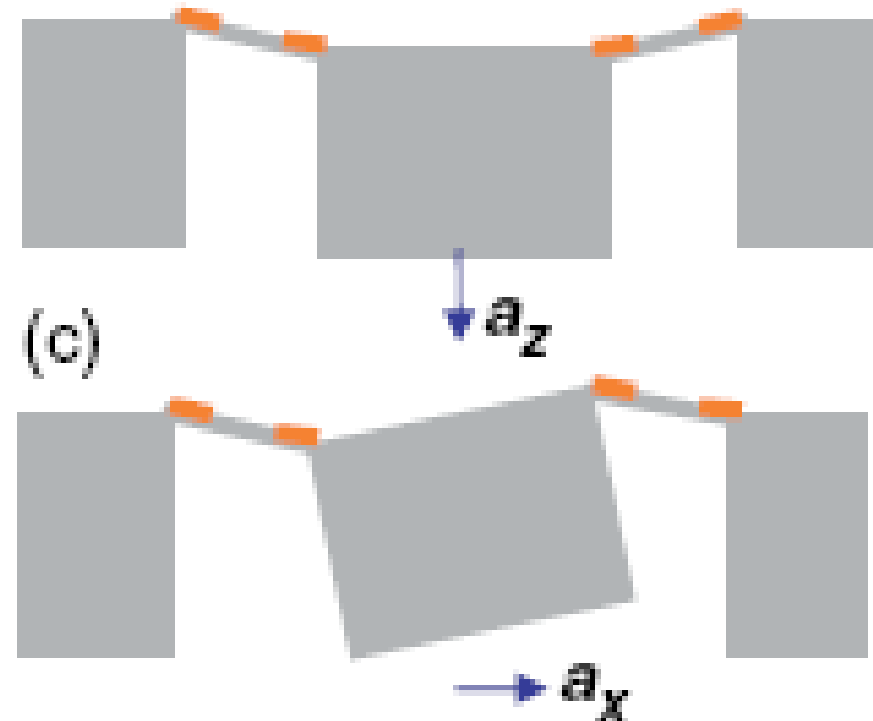


# Схема на три-осов пиезоелектричен акселерометър с една инерционна маса

(a) Изглед отгоре (x-y)



Напречен разрез



Инерционната маса е закрепена в центъра чрез 4 симетрични греди. Когато има ускорение по ос  $z$ , инерционната маса опъва горните слоеве на биморфните греди (т.е.,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$ , и  $y_2$ ), и натискат  $z_1$ - $z_4$ . Така **сумата от  $z_1$  до  $z_4$  измерва ускорение по  $z$ .**

Диференциалните компоненти  $x_1$ ,  $x_2$  и  $y_1$ ,  $y_2$  са нули. Когато има ускорение по  $x$  инерционната маса се завърта около  $y$ , опъва  $x_1$  и  $z_3$  и натиска  $z_1$  и  $x_2$ . Осен това предизвиква срязващи напрежения в  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $z_2$ , и  $z_4$ , които може да се пренебрегнат.

Така **ускорението по  $x$  предизвиква сигнал от разликата на  $x_1$  и  $x_2$ .** разликите от  $y_1$  и  $y_2$  и сумите от  $z_1$  до  $z_4$  са нула защото напреженията в  $y_1$  и  $y_2$  имат еднакви амплитуди и знак, а  $z_1$  и  $z_3$  имат еднакви амплитуди, но противоположни знаци. За ос  $y$  се прилага същият принцип.

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

Резонаторът е устройство, което **трепти с резонансна честота** и служи за **генериране на трептения с висока точност на честотата** или **да избере специфични честоти от сигнал**. Във втората си функция се нарича **честотен вълнов филтър**.

Пиезоелектричните акустични микрорезонатори са микроелектромеханични (MEMS) устройства с миниатюрни размери, ниска консумация на енергия и ниска цена. Това обуславя тяхното приложение през последните години като честотни филтри и сензори в телекомуникациите и други области от индустрията. Обобщено може да се каже, че пиезоелектричните микрорезонатори са MEMS устройства, в които се генерира и разпространява акустична вълна. Освен това те обикновено са принудени да вибрират в резонанс. Най-общо те се класифицират в две категории: **микрорезонатори с повърхностни акустични вълни (ПАВ)** и **микрорезонатори с обемни акустични вълни (ОАВ)**. Микрорезонаторите с обемни акустични вълни се подразделят на **солидно монтирани резонатори (СМР)** и **тънък-филм обемно акустичен резонатор (ФОАР)**.

Тези термини в английската литература са известни като: SAW- surface acoustic wave; BAW – bulk acoustic wave; SMR – solidly mounted resonator; FBAR - thin-film bulk acoustic wave.

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

**Акустична вълна** - смущение на еластичен медиум, което се разпространява по повърхността или целия обем на медиума и пренася енергия във вид на трептения

Акустичните вълни може да се разпространяват в почти всякакъв материал в Пиезоелектрични материали имат следните предимства:

- възможност за лесно възбуждане чрез електрическо поле (обратен пиезоелектричен ефект)

- лесно възприемане на енергията посредством правия пиезоелектричен ефект.

Сравнение на електромагнитните вълни с акустичните вълни при една и съща честота и един и същи медиум: ПЕ притежават значително по-малка дължина на вълната.

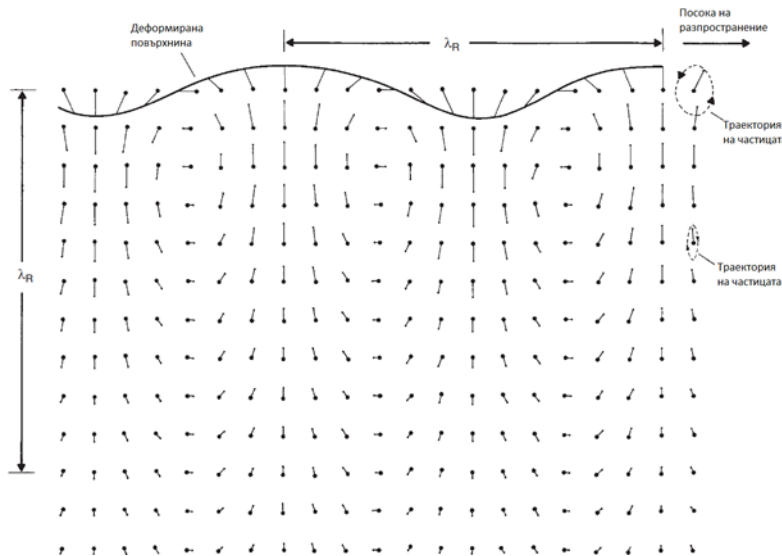
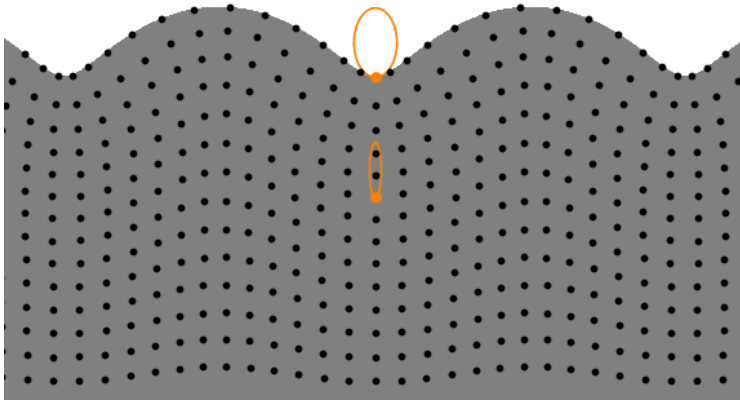
Например при честота от 10 MHz отношението на акустичната спрямо електромагнитната дължина на вълната е порядъка за 10000 пъти, а при честота 1 GHz това отношение е 1000000, а скоростта на акустичните вълни в същия медиум спрямо тази на електромагнитните вълни е 100000 пъти по-ниска.

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Повърхностни акустични вълни (ПАВ)

©2016, Dan Russell



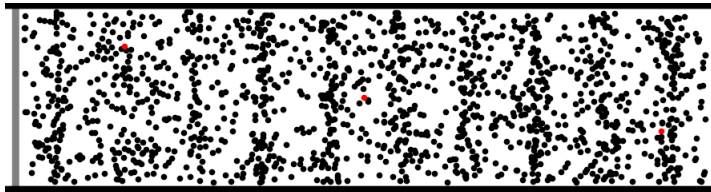
- разпространяват се на повърхността
- частиците от повърхността се въртят обратно на часовата стрелка по елипсовидни траектории[41].
- на определена дълбочина посоката на движение на частиците се обръща по часовата стрелка.
- амплитудата на вълната на Релей затихва експоненциално с отдалечаването ѝ от повърхността.
- енергията на цялата вълна е съсредоточена на дълбочина равна на една дължина на вълната.

Наричат се още вълни на Релей (Джон Уилям Стрът, трети лорд Рейли, 1842-1919 г.).

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

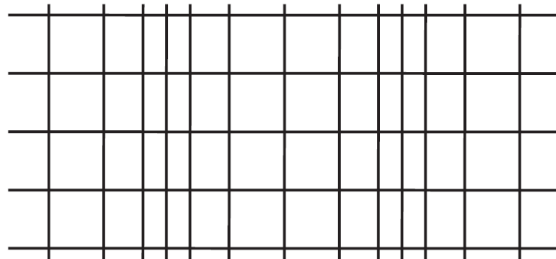
Обемни акустични вълни (ОАВ) - биват надлъжни и напречни



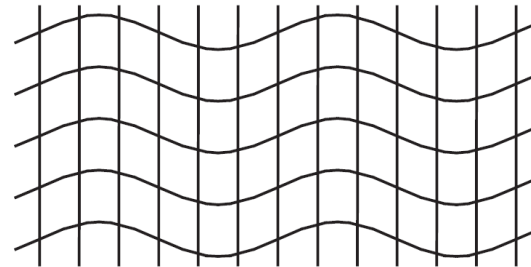
©2011, Dan Russell



- разпространяват през цялото тяло
- надлъжните вълни се разпространяват през средата паралелно на оста на трептенията (Фиг. 1.33 а).
- напречната обемна вълна се разпространява и отдава своята енергия в перпендикулярно на разпространението направление



а)



б)

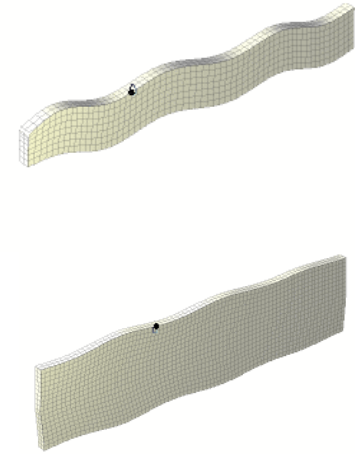
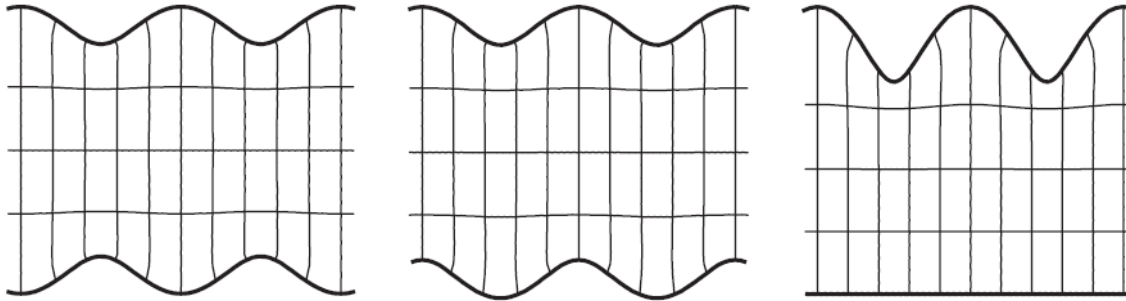
Посока на разпространение на вълната



# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Вълни на Ламб

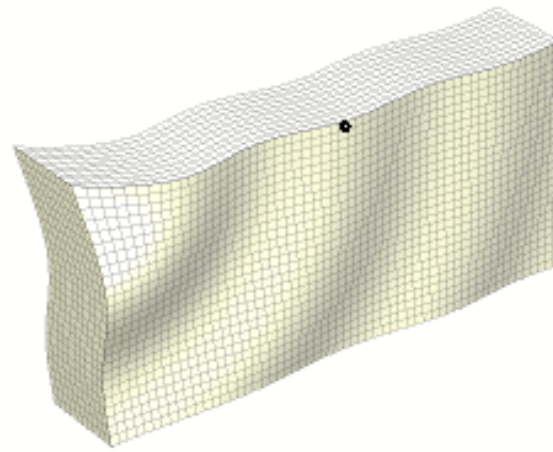


При тези вълни движението на частиците е по равнина, дефинирана от нормалната плоча и направлението на разпространение на вълната. Математическото описание на вълните на Lamb е достатъчно сложно поради което тези вълни не са били систематично изследвани досега. Макар и подобни, но съвсем различни, те често са наричани Rayleigh-Lamb вълни [43]. На Фиг. са показани основните видове вълни на Lamb и сумарната им производна, която както се вижда е вълна на Rayleigh.

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Вълни на Лав



При **вълните на Love** частиците се движат перпендикулярно на направлението на разпространение и се наричат хоризонтално поляризирани срязващи вълни (SH waves).



# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Вълнови свойства на пиезоелектрични материали

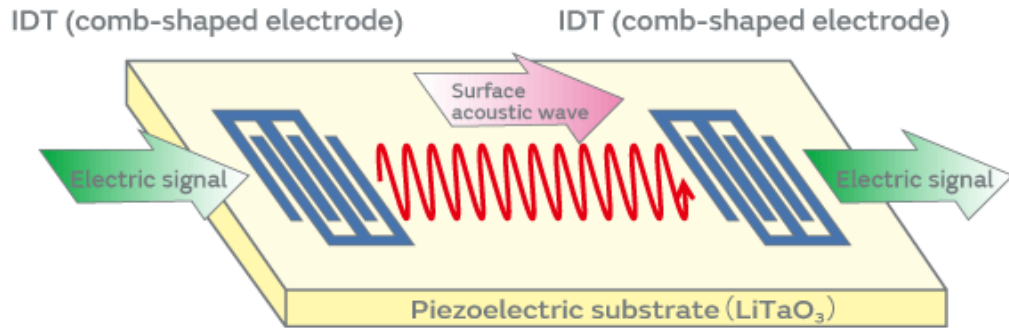
Материал		PZT-4	PZT-5H	PbNbO <sub>3</sub>	PVDF	LiNbO <sub>3</sub>	AlN	PMN-PT
Вид		„Твърда“ керамика	„Мека“ керамика	Високо температурна керамика	Полимер	Традиционен монокристал	Кристален тънък филм	Нов висококачествен моно кристал
Надлъжна скорост $v$	m/s	4600	4600	6200	1800	4600	3300	8000
Акустичен импеданс $Z=\rho v$	MRayl	35	34	19	3.9	34	37	32
Плътност $\rho$	kg.m <sup>3</sup>	7700	7500	6200	1800	4600	3300	8000
Механичен Q-фактор		Висок	Среден	Нисък	Нисък	Много висок	Много висок	Нисък

*Забележка: Данните в таблицата са ориентировъчни и са събрани от различни източници*

# Піезоелектричні сензори

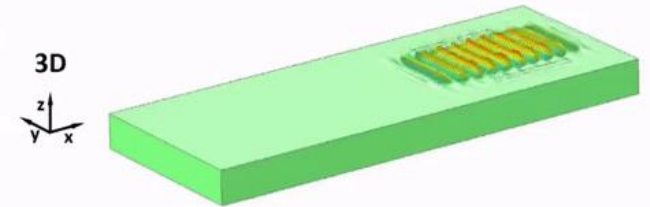
## Резонансні сензори

### Сензори с ПАВ

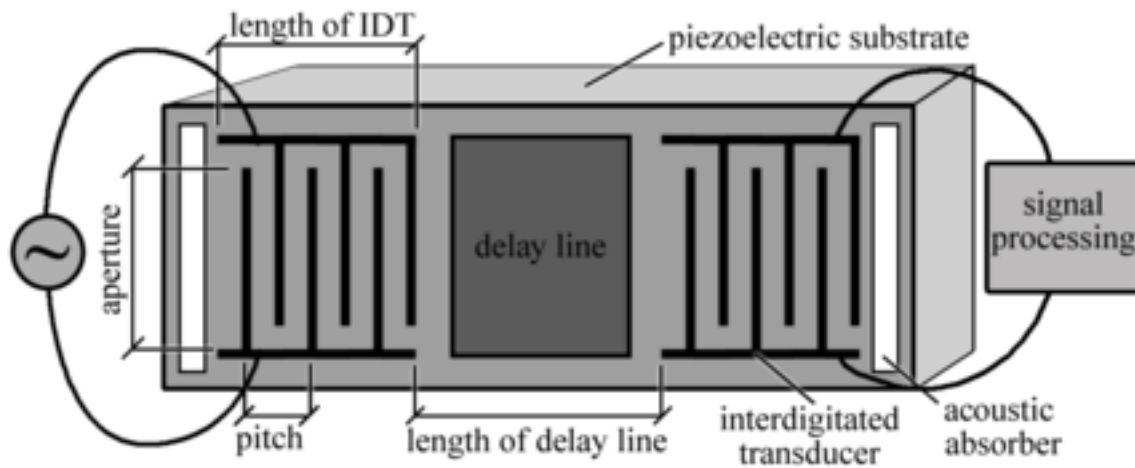


### Numerical simulation – transient pulse generation

$\lambda_{SAW} = 40 \mu\text{m}$ . 6 fp, 5T pulse



MONASH UNIVERSITY

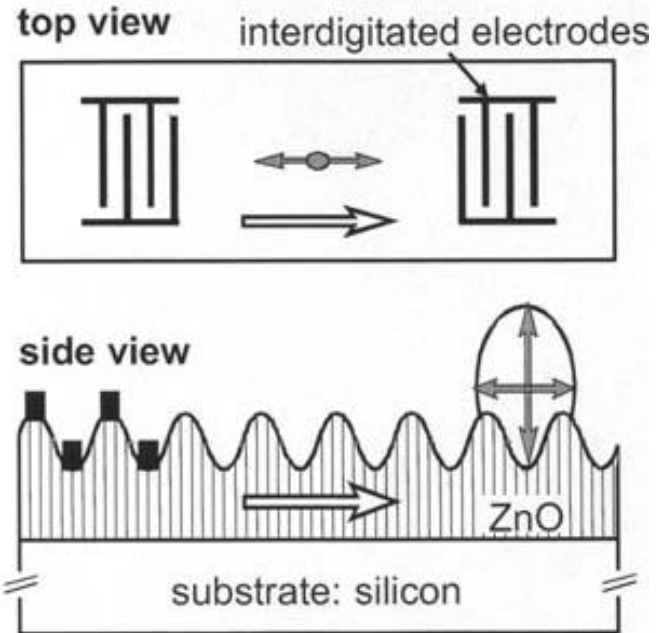
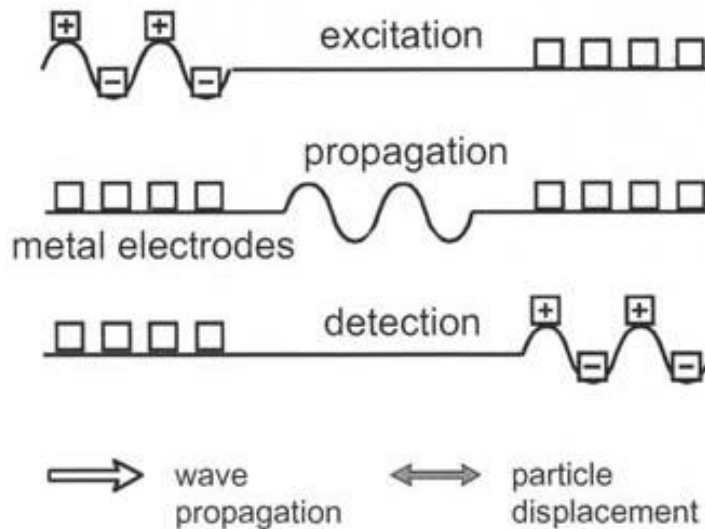


# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Сензори с ПАВ

#### Rayleigh SAW

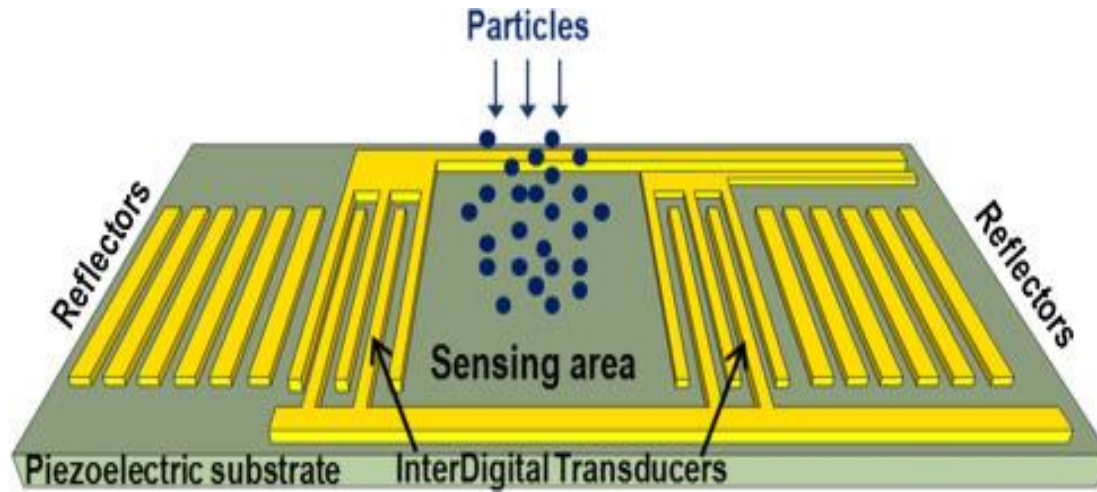


Прилага се AC напрежение към IDE намиращи се на повърхността на пиезоелектричен слой с подходяща ориентация на кристалните оси. Вследствие на обратния пиезоелектричен ефект една част от пръстите се движи нагоре, а другата надолу като създават механична осцилация на деформираща се повърхнина. Тази повърхностна деформация генерира акустична вълна (ПАВ), разпространяваща се по повърхнината и се конвертира отново в електрически сигнал чрез деформиране на повърхнината в региона на приемащия преобразовател чрез правия пиезоелектричен ефект.

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Сензори с ПАВ



ПАВР сензор за детектиране на суб-микронни частици с маса под 1 ngr

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Сензори с ОАВ



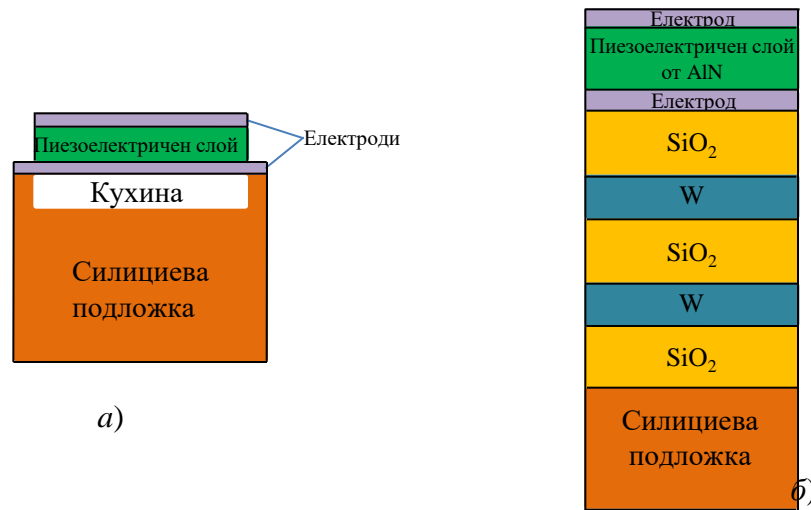
Общ вид на резонатор с ОАВ

$$f_0 = \frac{v}{2t}$$

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Сензори с ОАВ

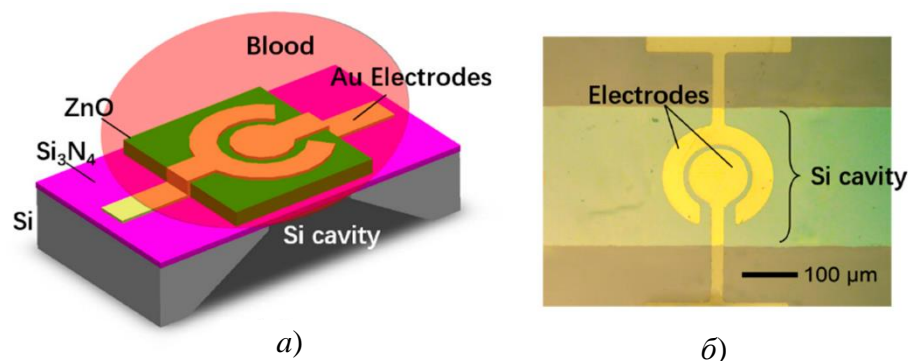


Тънко филмови обемно акустични вълнови резонатори (ТФОАВР) (Фиг. а) и Солидно монтирани резонатори (СМР) (Фиг. б)

# Пиезоелектрични сензори

## Резонансни сензори

### Сензори с ОАВ



ZnO сензор с ТФОАВР за кинетичен анализ на коагулацията на човешката кръв. Резонаторът работи в резонансен режим на срязване с дебелина при 1.4 GHz. Когато резонаторът влиза в контакт с течната среда, ефектът на вискозния товар оказва допълнителното съпротивление и индуктивност в еквивалентните схеми, което води до линейно отношение с наклон приблизително  $-217 \text{ kHz/cP}$  между течния вискозитет и честотата на резонатора [47].

# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

Ултразвуковите сензори излъчват къси, високочестотни импулси на звук на редовни интервали. Те се разпространяват във въздуха със скоростта на звука. Когато звуковите вълни стигнат до повърхността на предмет, се отразяват обратно като ехо сигнали към сензора, който сам изчислява разстоянието до целта въз основа на времето между излъчването на сигнала и получаването на ехо.

Тъй като разстоянието до даден обект се определя чрез измерване на времето на разпространение на ултразвуковата вълна, а не чрез интензивността на звука, ултразвуковите сензори са отлични при потискане на смущенията на фона. На практика с тях могат да бъдат открити всички материали, които отразяват звука, независимо от техния цвят. Дори прозрачни материали или тънки фолиа не представляват проблем за ултразвуков сензор.

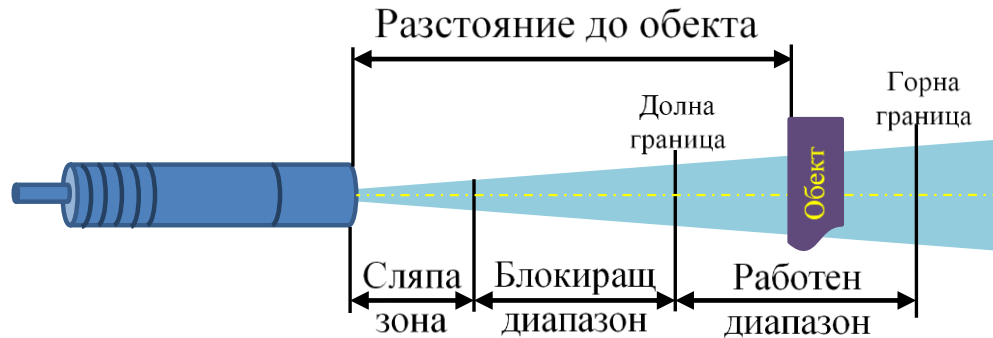
Ултразвуковите вълнови сензори намират приложение в медицинската диагностика, неразрушителна дефектоскопия, холография, сензори за разстояние, сензори за дебелина, за измерване на дебит, за мониторинг на структури и ултразвукова микроскопия



# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

### Ултразвуковите сензори за близост и разстояние



Интервалът от време между предавания сигнал и ехото е право-пропорционален на разстоянието между обекта и сензора. Работният диапазон може да се регулира по отношение на ширината и позицията му в обхвата на наблюдение. Горната граница подлежи на настройка за всички сензори. Долната граница може да се регулира само в определени версии. Обектите извън горната граница не променят изхода на сензора. Това състояние се нарича "изчистване на фона". При някои сензори съществува и блокираща област. Това е зоната между долната граница и сляпата зона. Произволен обект, поставен в диапазона на блокиране предотвратява идентифицирането на целта в работния диапазон.

# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

### Ултразвуковите сензори за близост и разстояние

Посоченият тук метод е известен като „Измерване на времето на отразения импулс“ или „Ретрорефлективен метод“. Той се прилага за определяне на нива на течности, автоматични врати, паркиращи системи на автомобили и др.

Освен това се прилагат методи като:

- метод за детекция на сигнал с непрекъснатата вълна - за броящи уреди, ключове, паркиращи устройства;
- с приложение на доплеров ефект – алармени системи, скорости на механични вибрационни процеси;
- директно измерване на времето за разпространение – денситометри, дебитометри;
- измерване на завихряния на Карман – за дебитометри;
- метод на прекъсване на лъча. При този метод детекторът и излъчвателят се разполагат един срещу друг. Вследствие на по-малкото разстояние, което изминава ултразвуковият импулс и съществено по-малките загуби при разпространението, максималното разстояние е около 2,5 до 3 пъти по-голямо от това при ретрорефлективния метод [[48](#)]

# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

### MEMS ултразвукови сензори за близост и разстояние

### Пиезоелектрични микроелектромеханични ултразвукови преобразователи (пМУП)

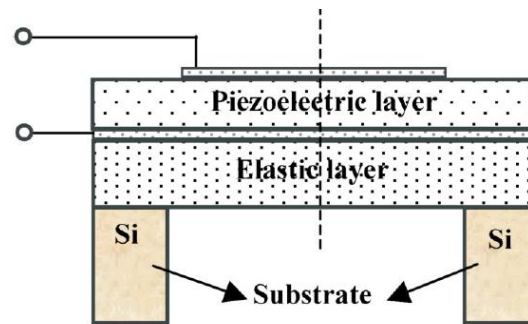
#### Предимства

-малки размери, като по отношение обема са 1000 пъти по малки от конвенционалните.

-много ниска мощност, която е не по-висока от 15  $\mu\text{W}$ .

-голям диапазон на действие, надвишаващ 1 m.

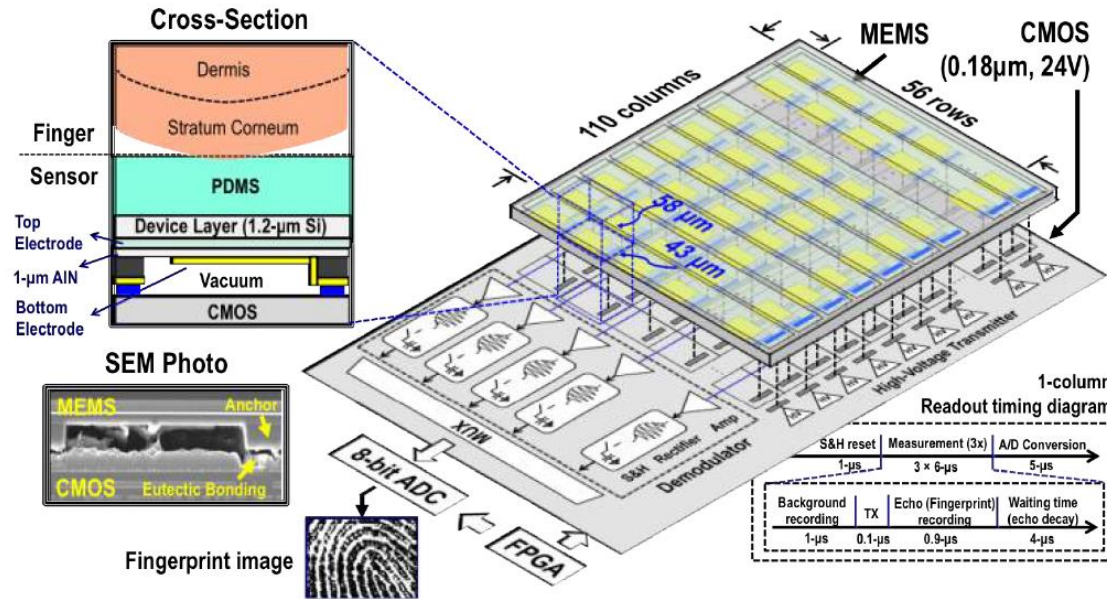
-съвременните MEMS ултразвукови преобразуватели са цифров интерфейс, интегриран в един чип с преобразувателя.



# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

### MEMS ултразвукови сензори за близост и разстояние



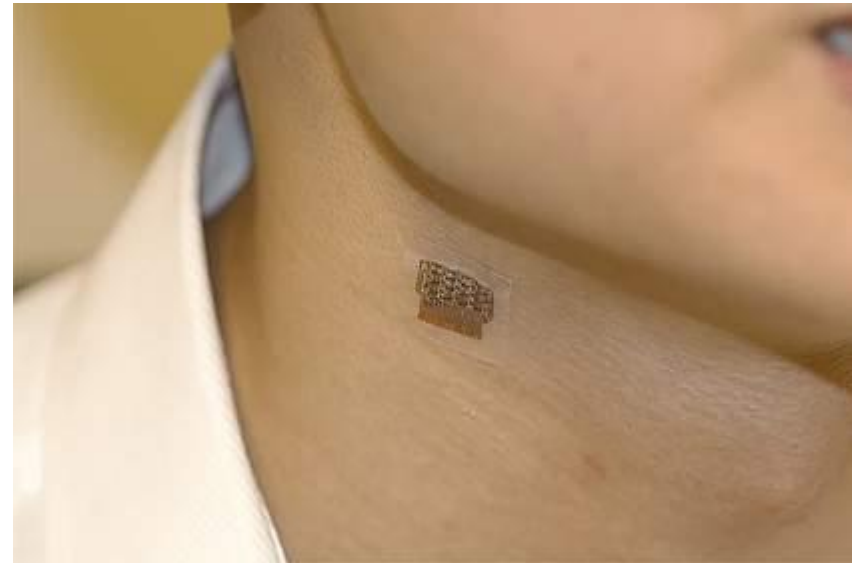
Сензор за пръстови отпечатьци, съставен от матрица с 6160 пМУП сензори[[50](#)]

Масив от 56 реда на 110 колони матрица или общ брой 6160 пиксела, за да се прилагат в пиезоелектрично устройство за четене на пръстови отпечатьци с висока разделителна способност. Размерите на пМУП са 58x43 µm. Над горния електрод е разположен един слой от Si с дебелина 1.2 µm и още един слой от PDMS с дебелина 250 µm[[50](#)].

# Пиезоелектрични сензори

## Ултразвукови вълнови сензори

### Преносим MEMS ултразвуков сензор за кръвно налягане



Масив от MEMS ултразвукови сензори във формата на пластир измерва кръвното налягане в движение. Ултразвуковите вълни достигат на дълбочина от 40 mm под кожата и измерват налягането на артерия или вена.

<https://www.nih.gov/news-events/nih-research-matters/wearable-ultrasound-patch-tracks-blood-pressure>

# Приложения

## Съхраняване на данни

- Тестване на магнитни глави
- Тестване на дискове
- Активно погасяване на вибрации

## Полупроводници и микроелектроника

- Нано и микролитография
- Свръхзвуково запояване
- Позициониране на маски и подложки
- Системи за проверка
- Активно погасяване на вибрации

## Прецизна механика

- Бързо управление на инструменти
- Свръхзвуково пробиване
- Активно погасяване на вибрации
- Структурни деформации
- Настройване на инструменти
- Компенсиране на износване
- Задвижване на клапани
- Микро-помпи
- Линейни задвижвания
- Управление на режещия ръб на ножа при инструменти за екструзия
- Микро-гравиращи системи

## Медицински и стоматологични технологии

- Скенери на мозъка
- Свръхзвуково премахване на катаракта
- Свръхзвукови скалпели
- Почистване на зъбен камък
- Разбиване на камъни в бъбреците
- Проникване в клетки
- Микроразпределители на лекарства

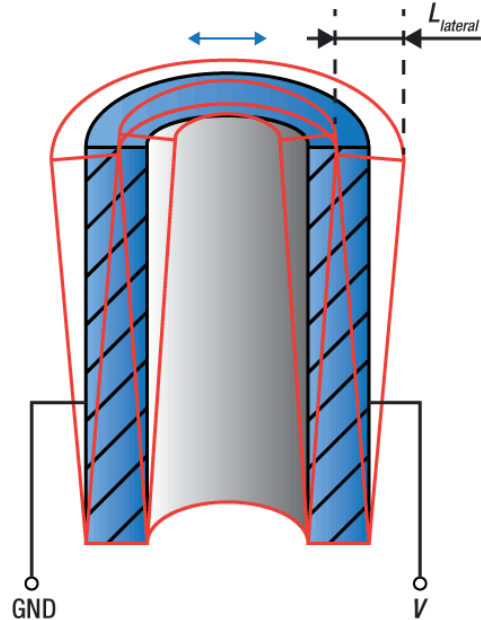
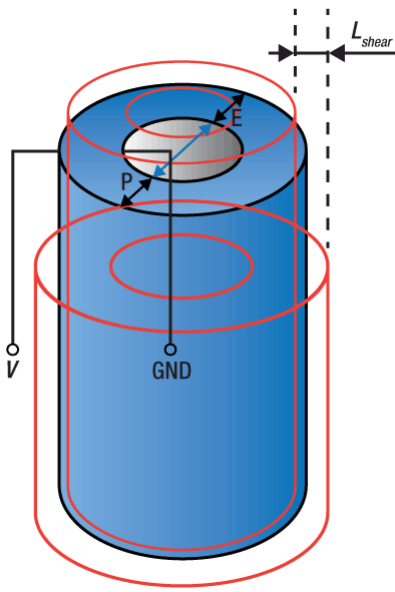
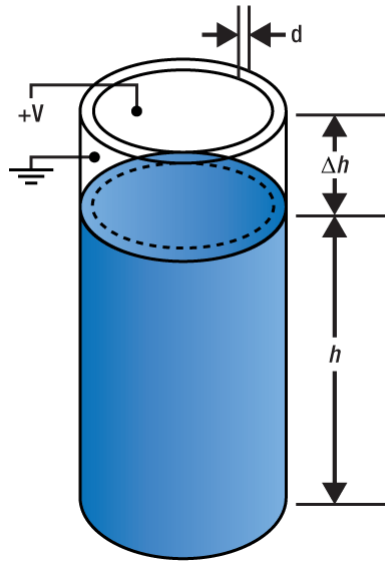
## Оптика, Квантова механика

- Сканиращи огледала
- Стабилизатори на образ, размножаване на пиксели
- Сканиращи микроскопи
- Авто-фокусиращи системи
- Ориентиране на влакнеста оптика
- Превключватели за влакнеста оптика
- Адаптивна и активна оптика
- Настройване на лазери
- Стимулиране на вибрации

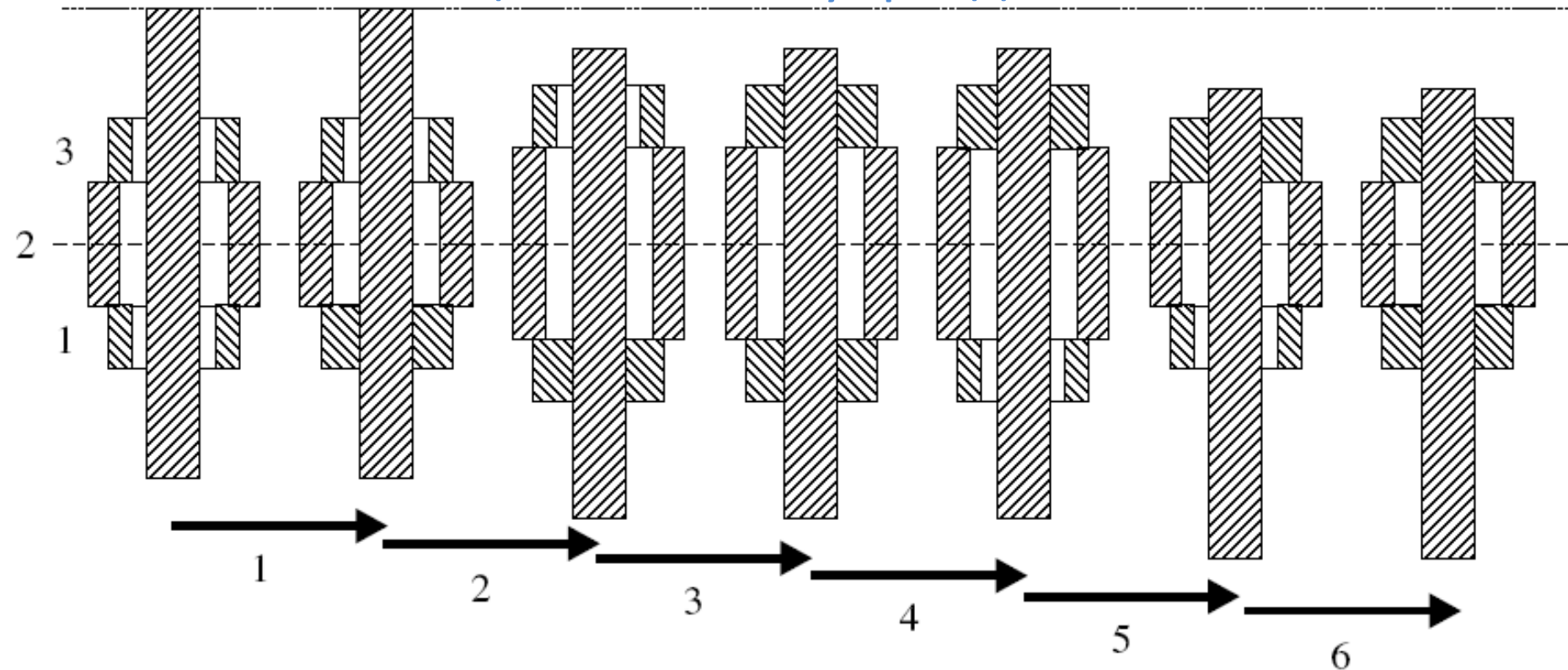


# Цилиндрични и пръстеновидни схеми на задвижване

Ring Actuators



# Работни цикли на инчуорм двигател



1. Първо се задвижва керамичен пръстен (1), така че да се деформира радиално и захване ротора.

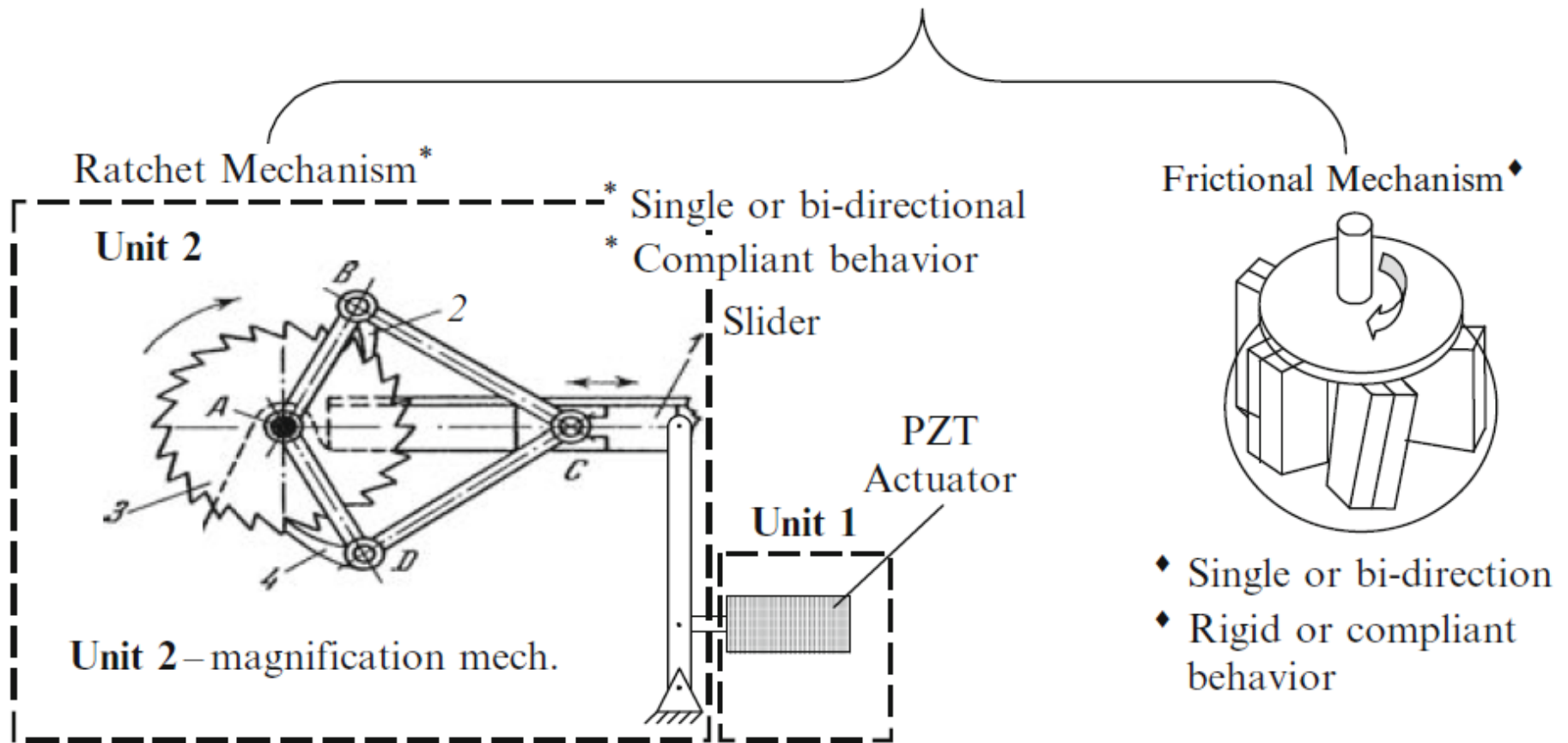
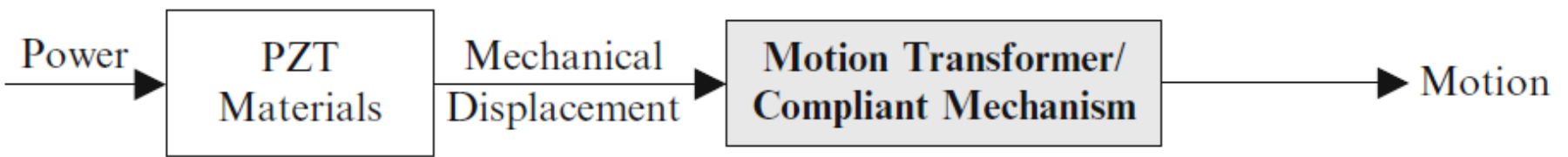
2. Пиезоелектричният пръстен (2) се разтяга по оста. Средата на (2) е неподвижна и преместването е равно на половината от аксиалната деформация.

3. Третият пръстен (3) се затяга върху ротора, докато (2) все още разтегнат.

4. Първият пръстен (1) освобождава ротора.

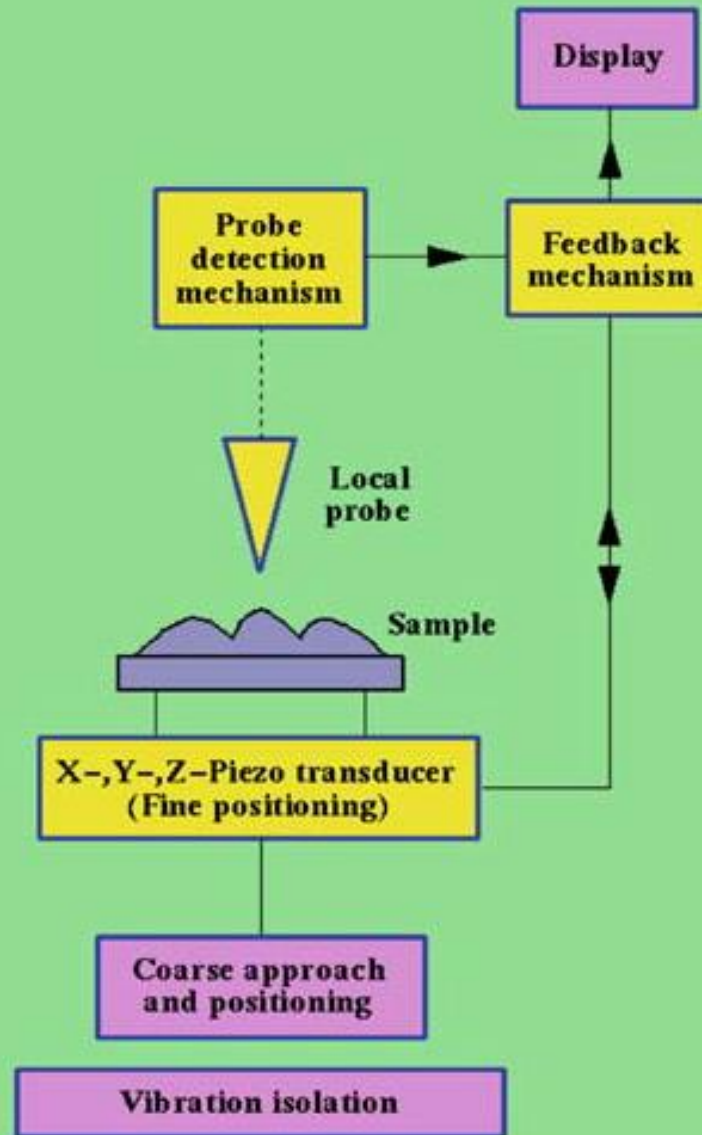
5. Вторият пръстен (2) се освобождава (свива) и в резултат на това роторът отново се премества осово на половината от цялата деформация.

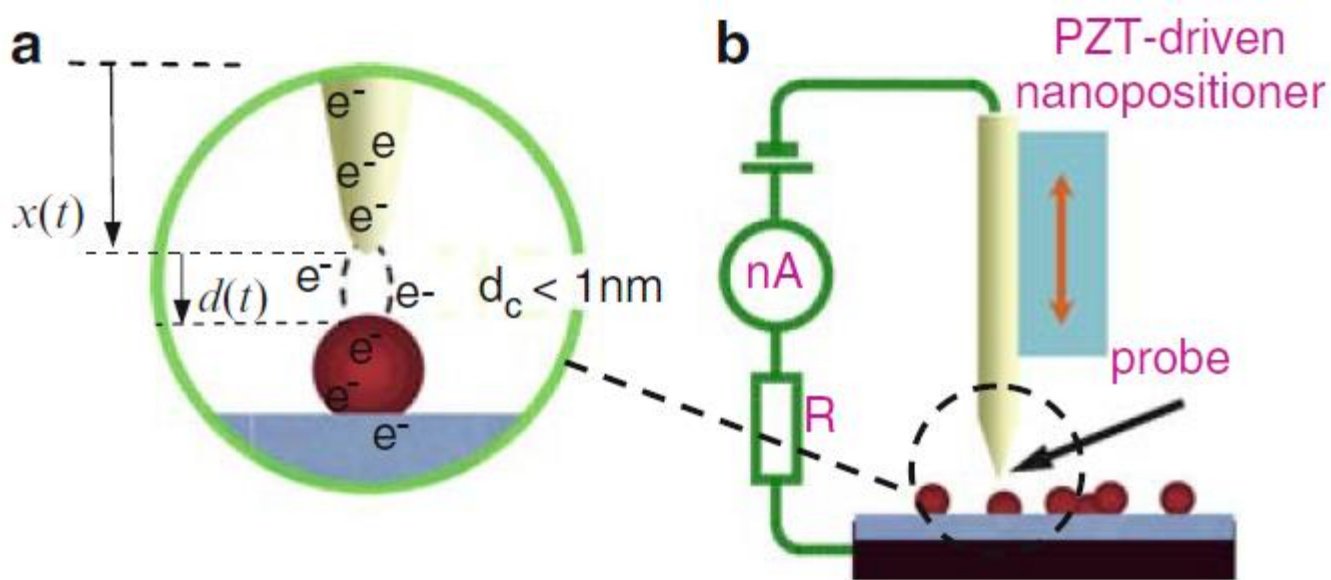
6. Трети пръстен (3) се освобождава и цикълът се затваря.



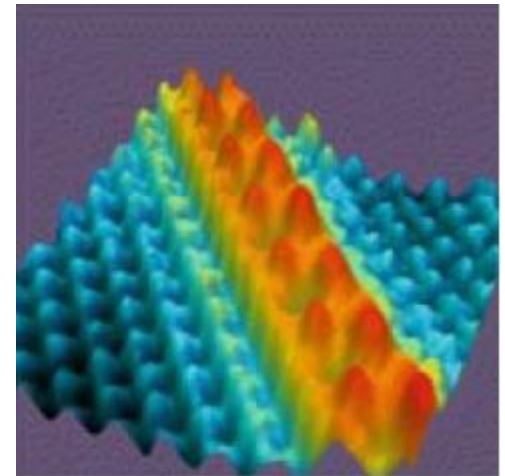
PZT-based miniature motor with ratchet and frictional motion transformer concepts

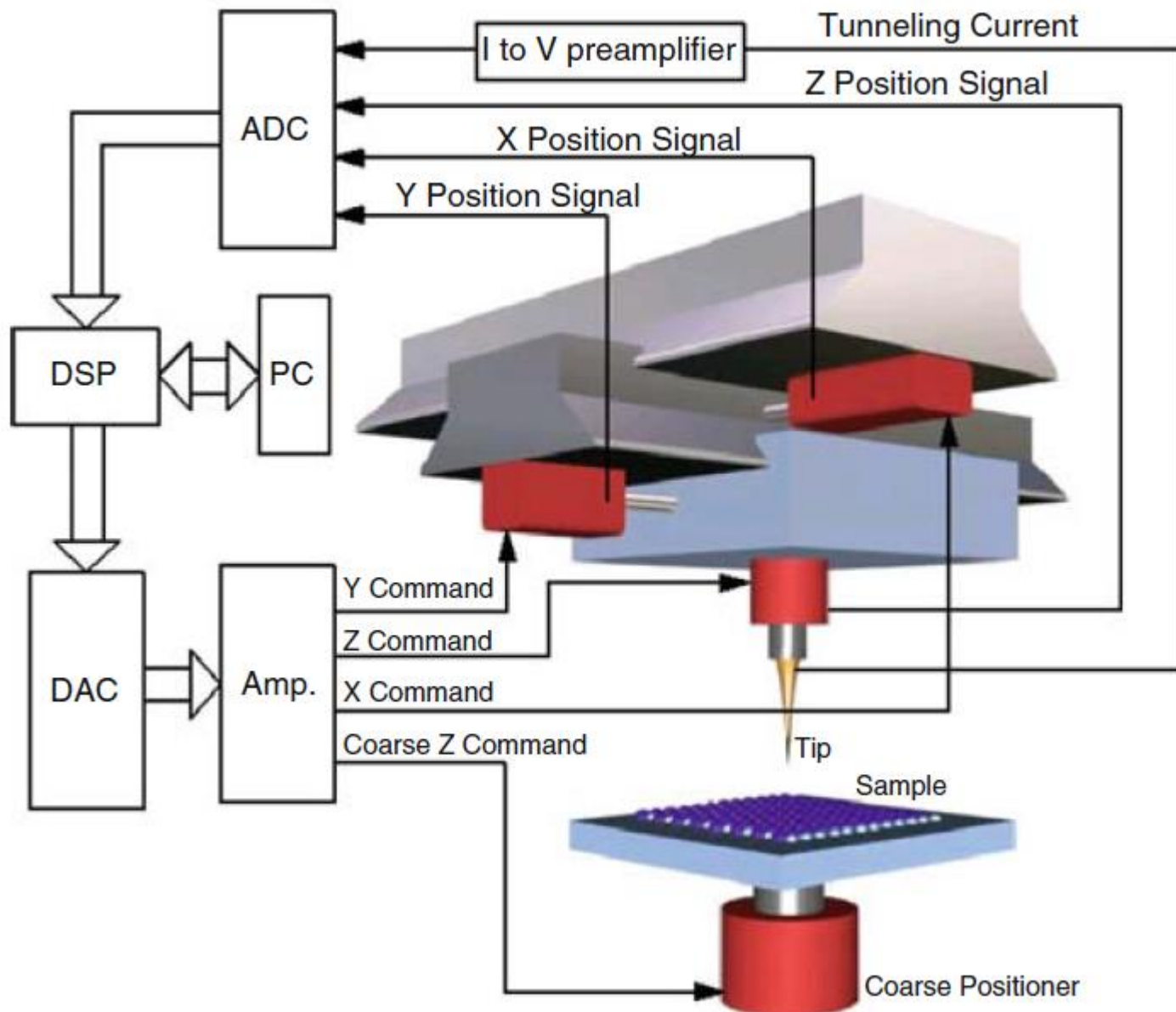
# Generalized Schematic of a Scanning Probe Microscope



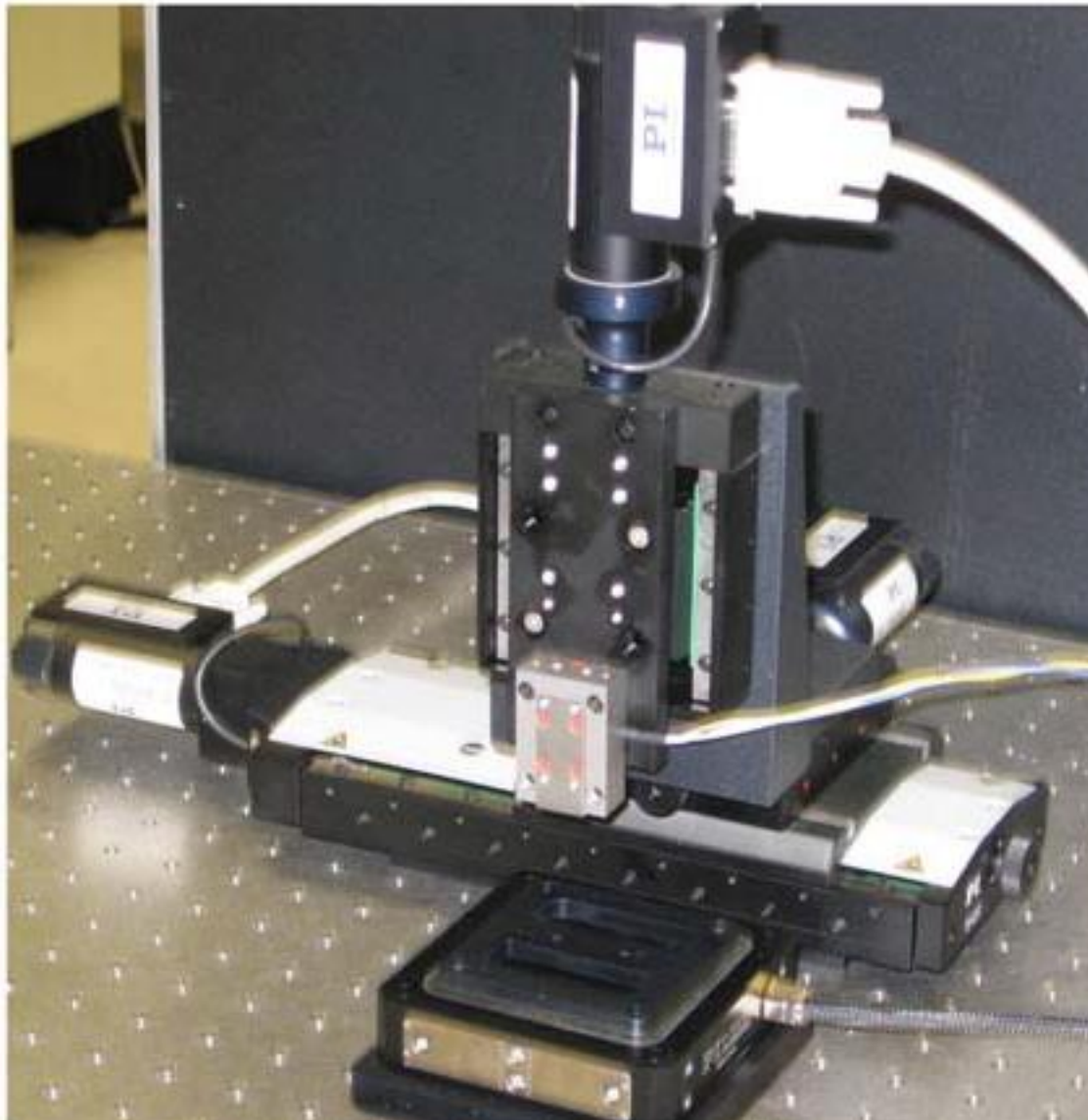


STM principle of operation and (c) STM image of GaAs(110) surface (<http://physics.nist.gov>)

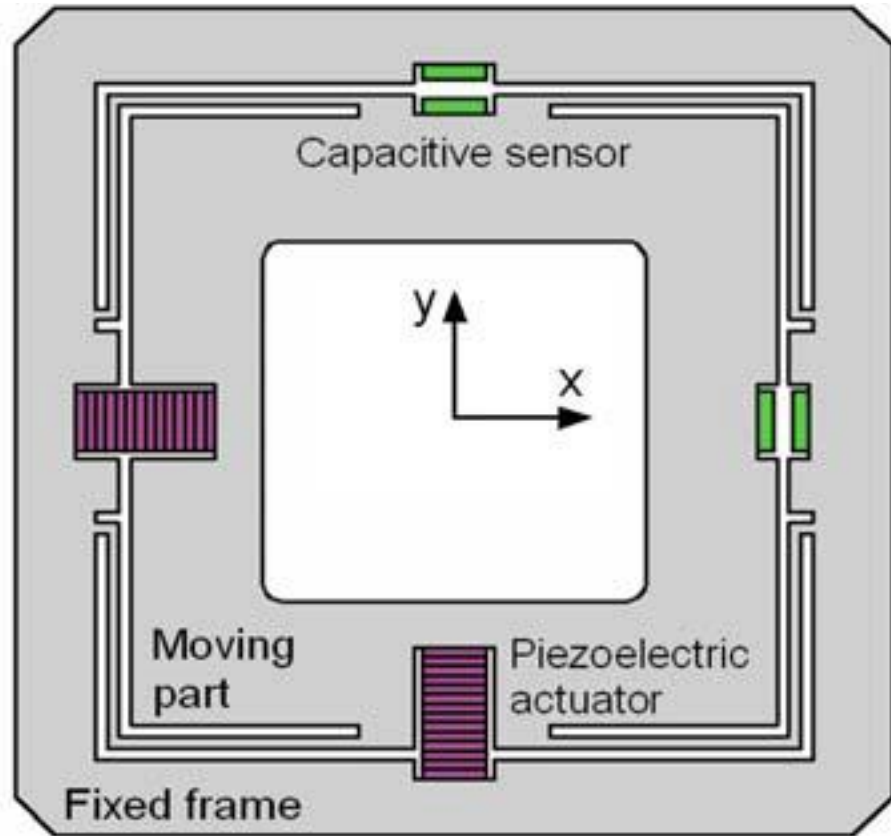
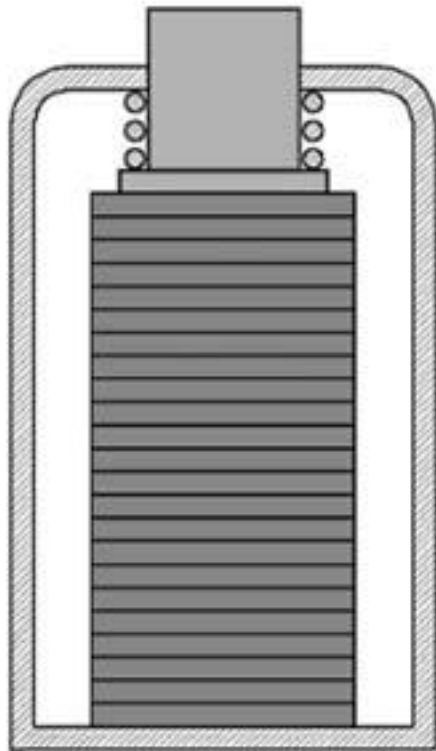






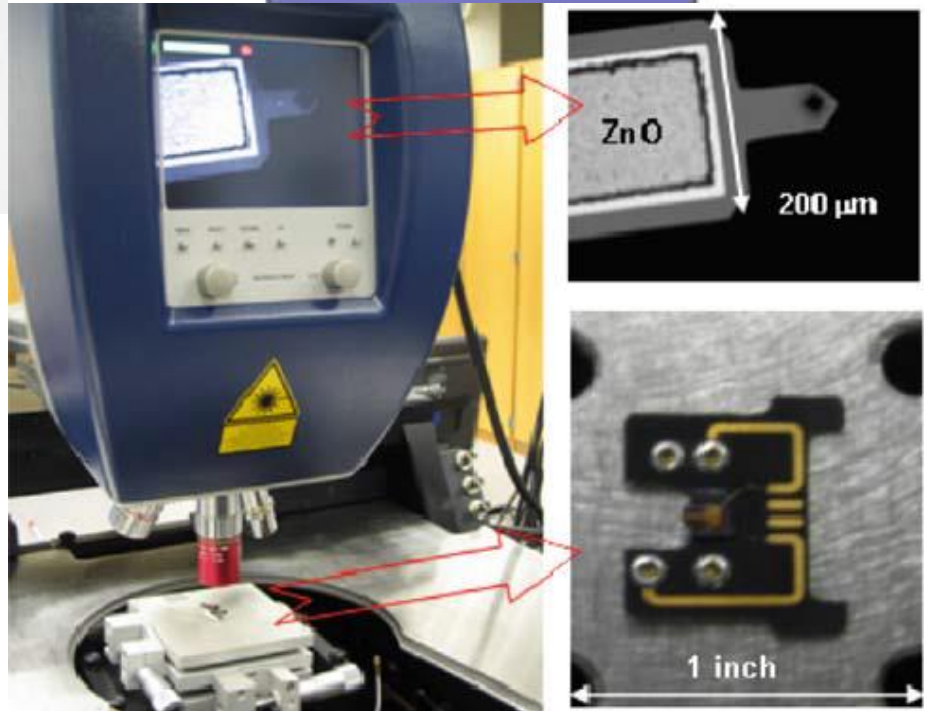
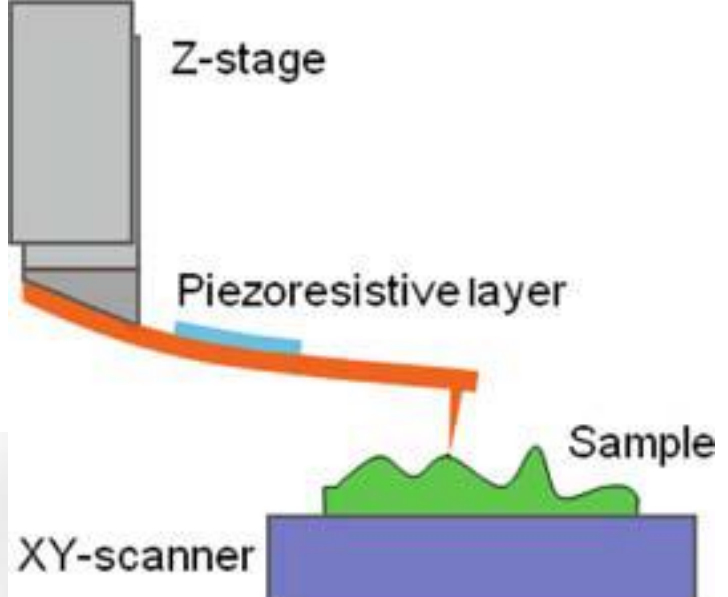
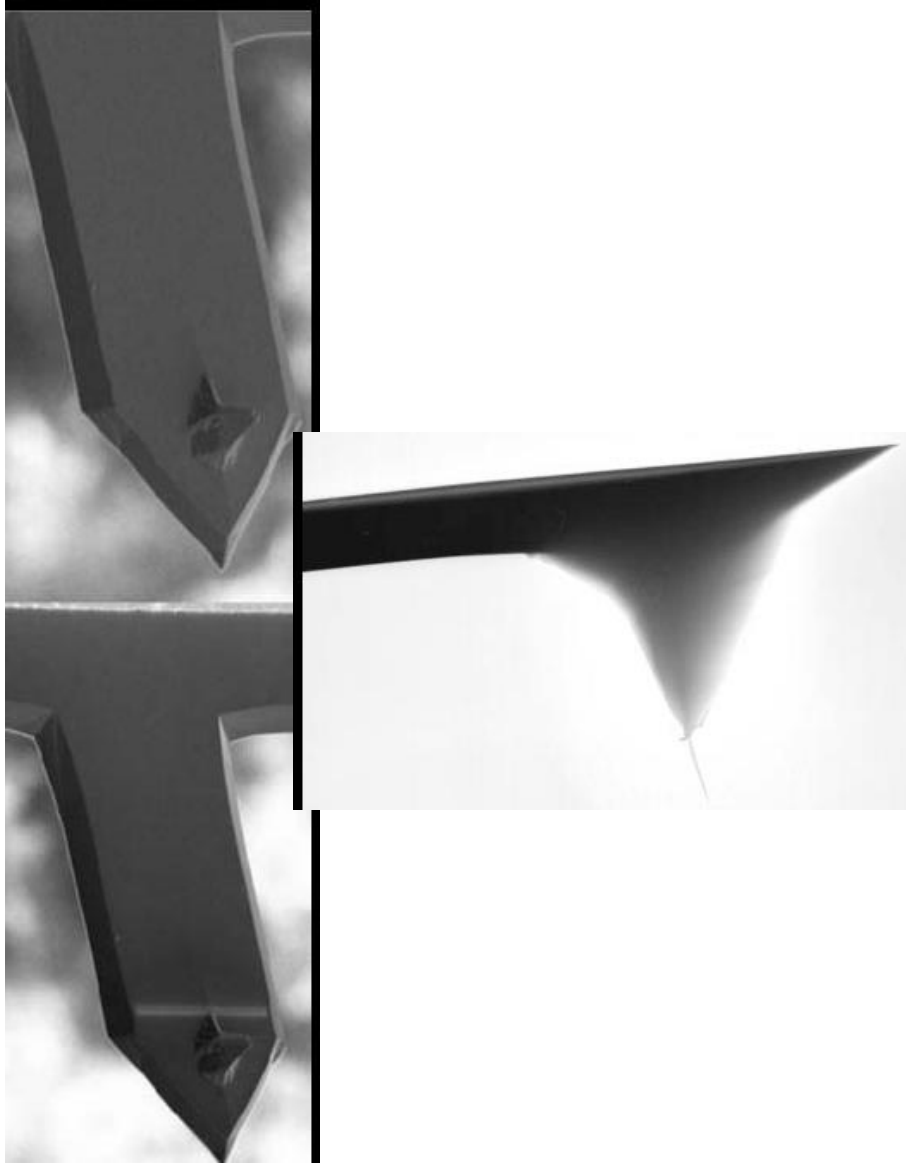


**Fig. 10.10** (*top*) Schematic view of STM operation and control system, (*bottom*) experimental setup of the STM module micro/nano-positioner built at Clemson University Smart Structures and NEMS Laboratory



Schematic of piezoelectrically driven fine positioners;  
(left) fine z-positioner and (right) combined x-y  
positioner

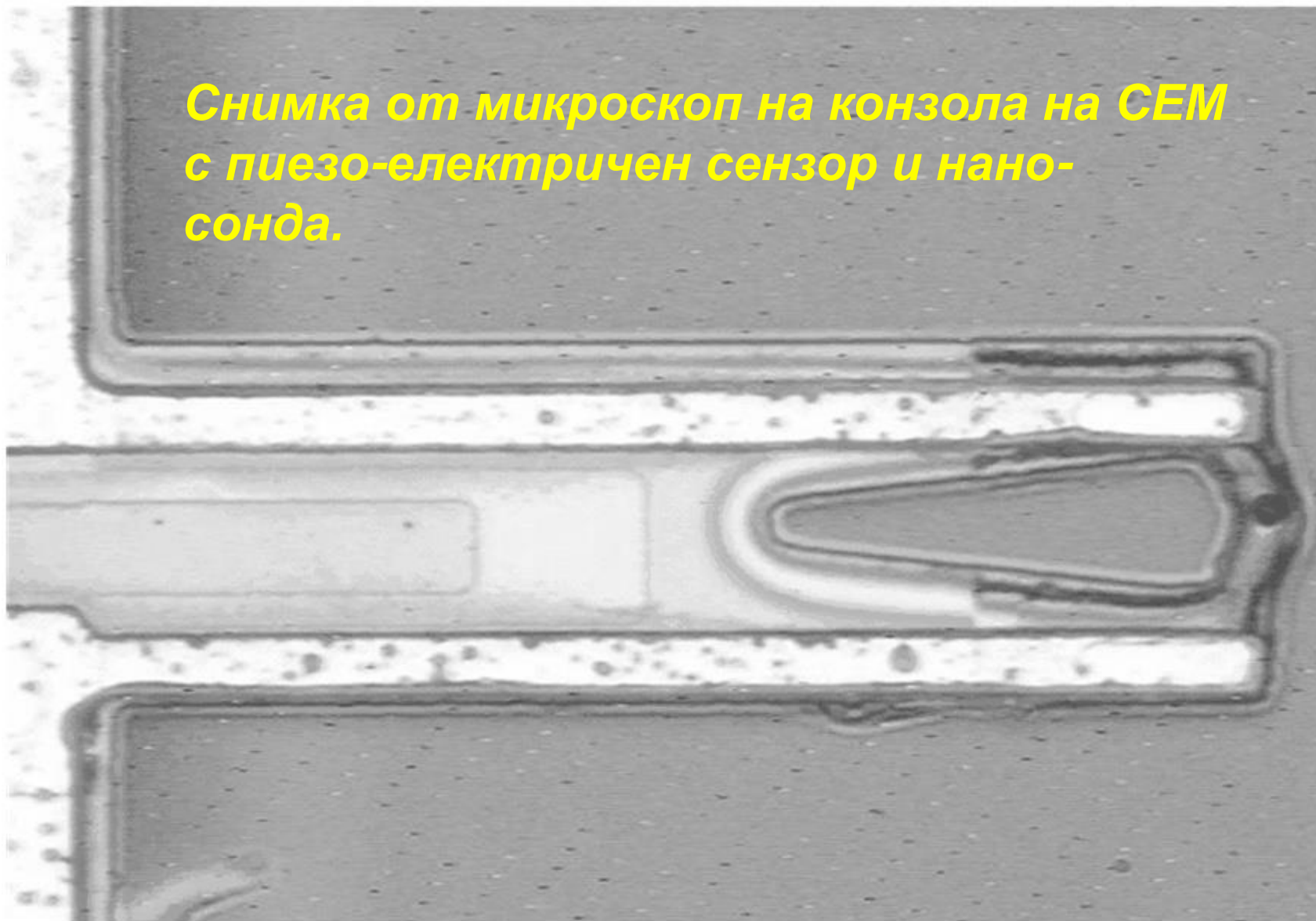




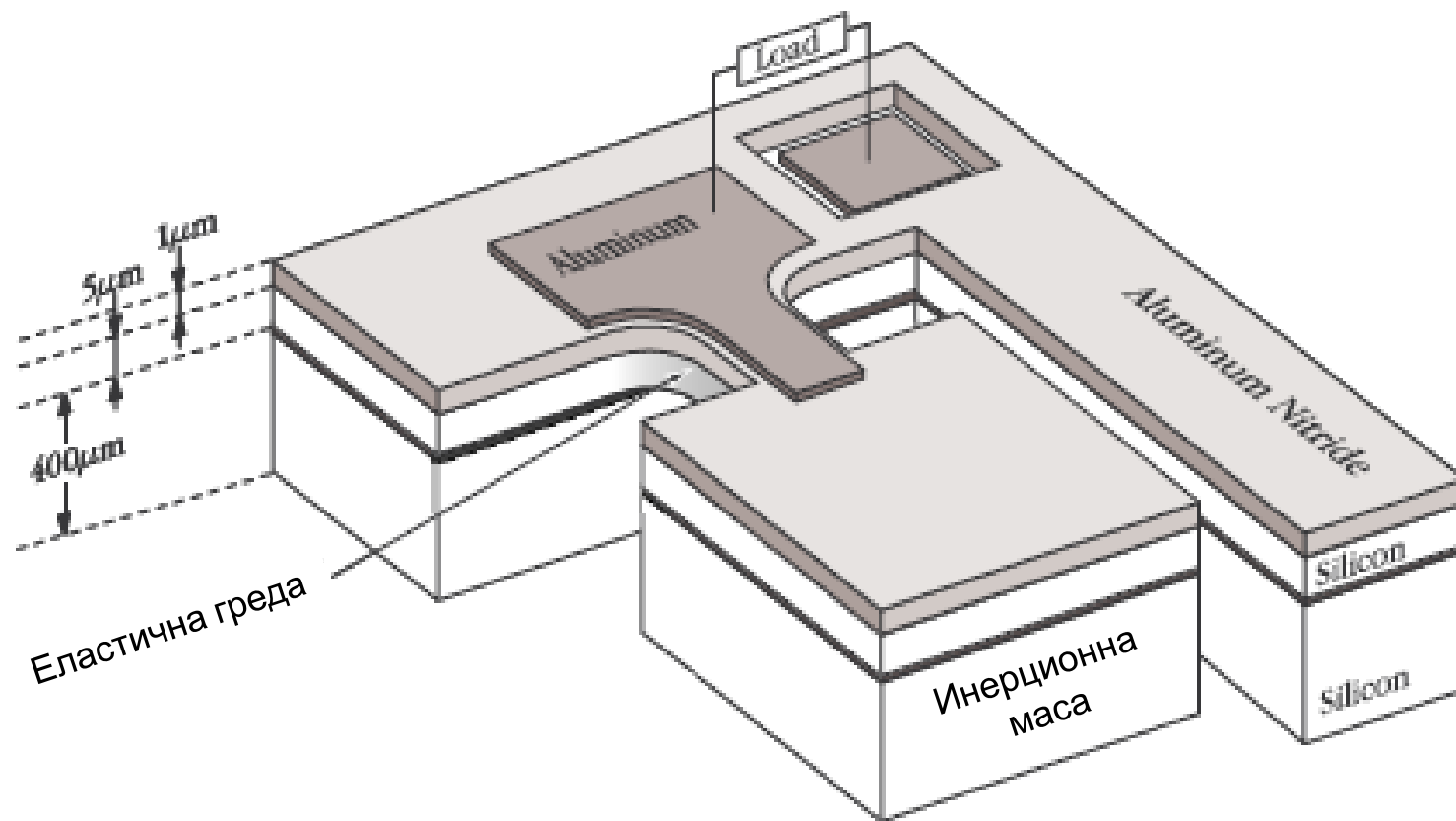
SEM images of active probe cantilevers before (a) and after (b) tip mass deposition

Source: Salehi-Khojin et al. 2009b, with permission  
3.1.2019 г.

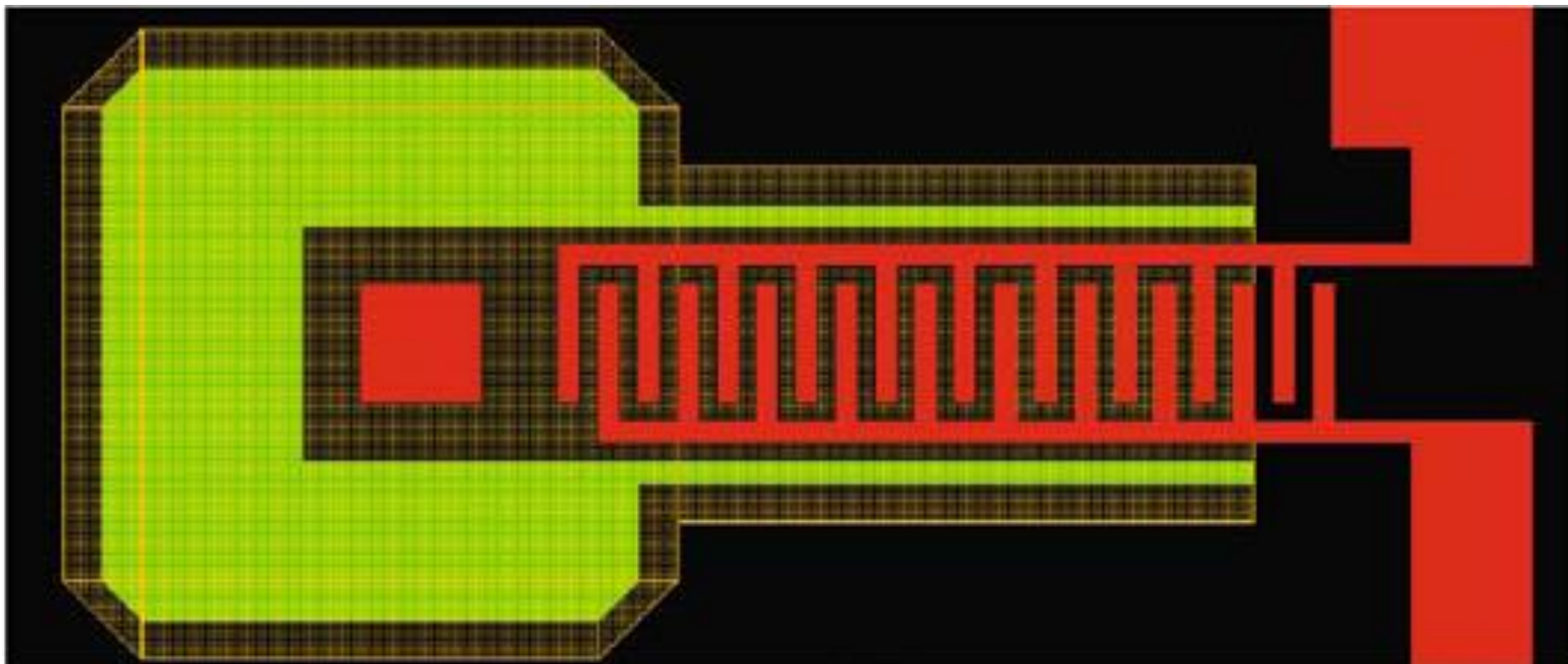
*Снимка от микроскоп на конзола на СЕМ  
с пиезо-електричен сензор и нано-  
сонда.*



**Микрохарвестер** – устройство за добиване на електроенергия от вибрационни източници. Плътноста на мощност на такива устройства е от порядъка на  $300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ . Структурата на микрохарвестера е подобна на тази на z-осовия акселерометър, но параметрите се подбират така, че да се получи най-голямо енергоотдаване в честотния диапазон на виброизточника от 50 до 450 Hz.



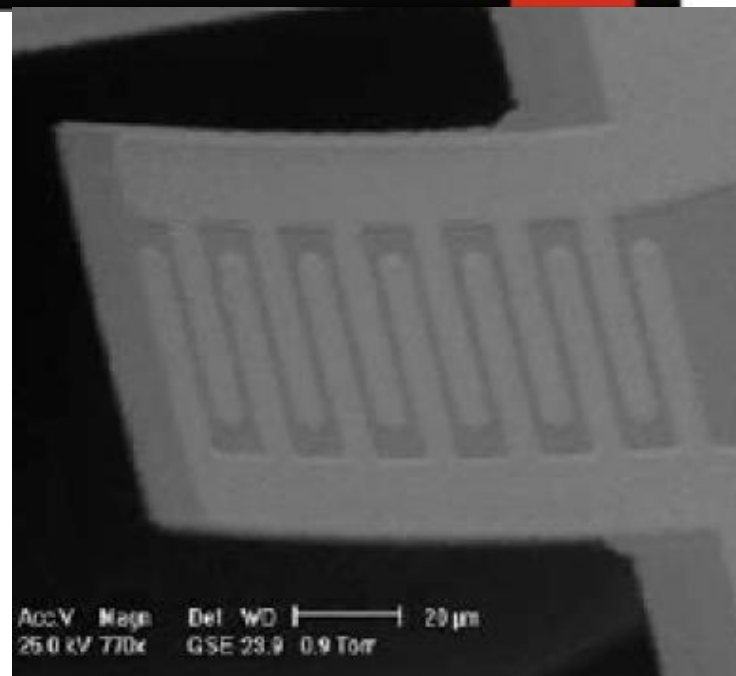
# Микроконзола с пиезоелектричен филм и електроди тип сплетени пръсти (IDE)

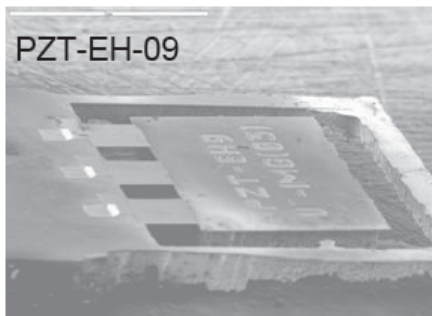


## Приложения:

- безжични сензори в автомобилите и комуникациите;
- зареждане на батерии в мобилни телефони;
- зареждане на батерии в устройства за медицинската техника;
- хранване на консуматори с малка мощност .

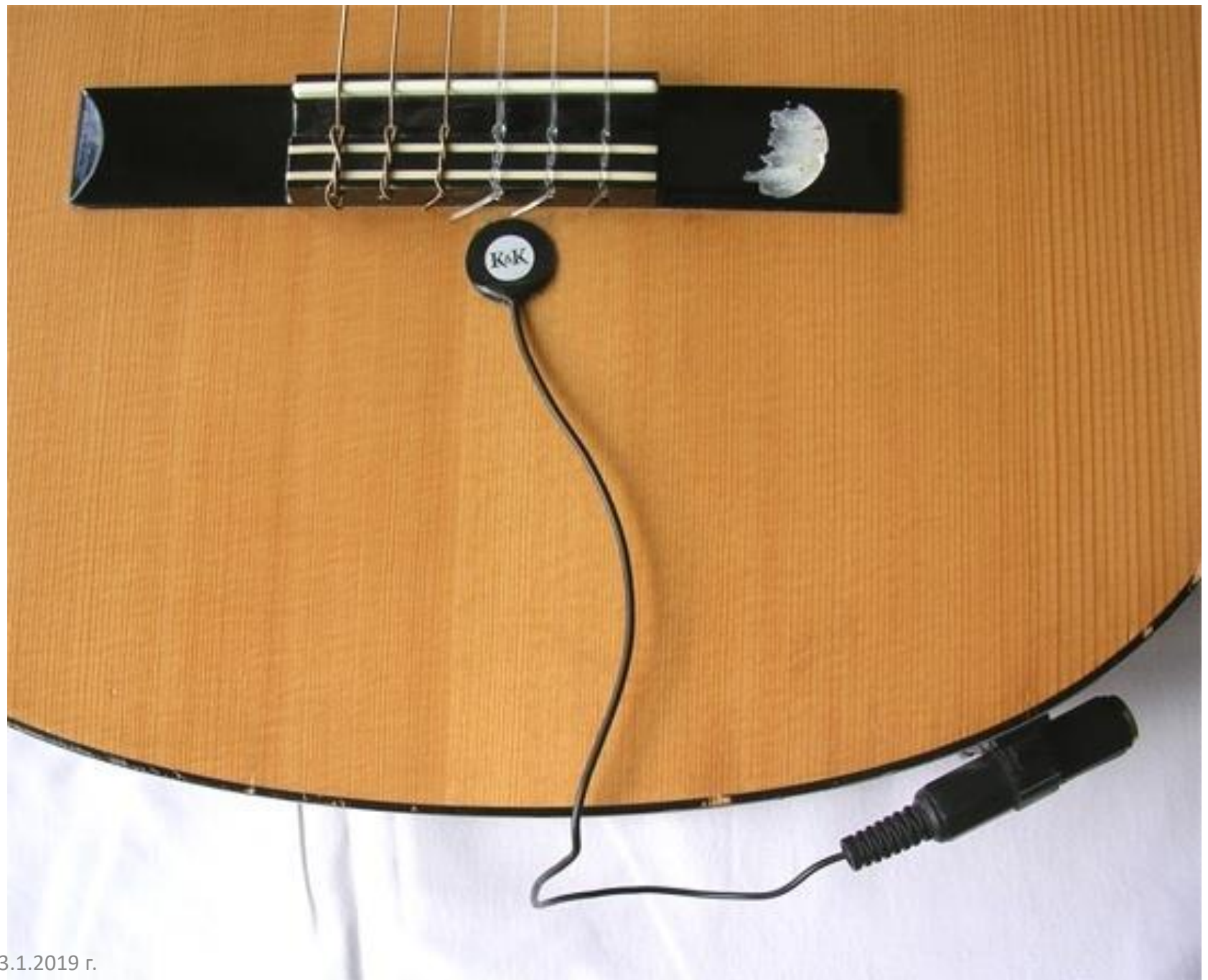
3.1.2019 г.





Размери на устройството		
	PZT-EH-07	PZT-EH-09
Дължина на гредата	1 mm	0.5 mm
Ширина на гредата	1 mm	0.5 mm
Дебелина на гредата	12 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$
Дължина на PZT	1 mm	0.5 mm
Ширина на PZT	1 mm	0.5 mm
Дебелина на PZT	1 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
Дължина на масата	2.5 mm	1.8 mm
Ширина на масата	4 mm	2.4 mm
Дебелина на масата	500 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$





3.1.2019 г.



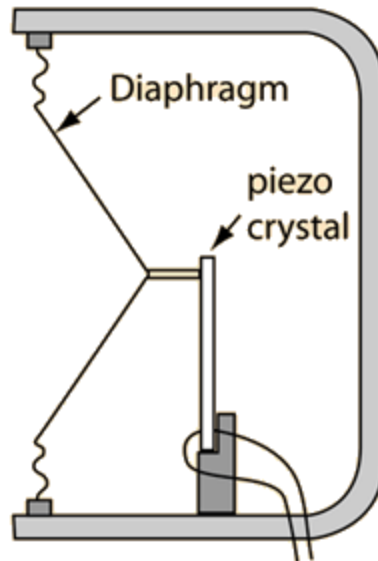
3.1.2019 г.

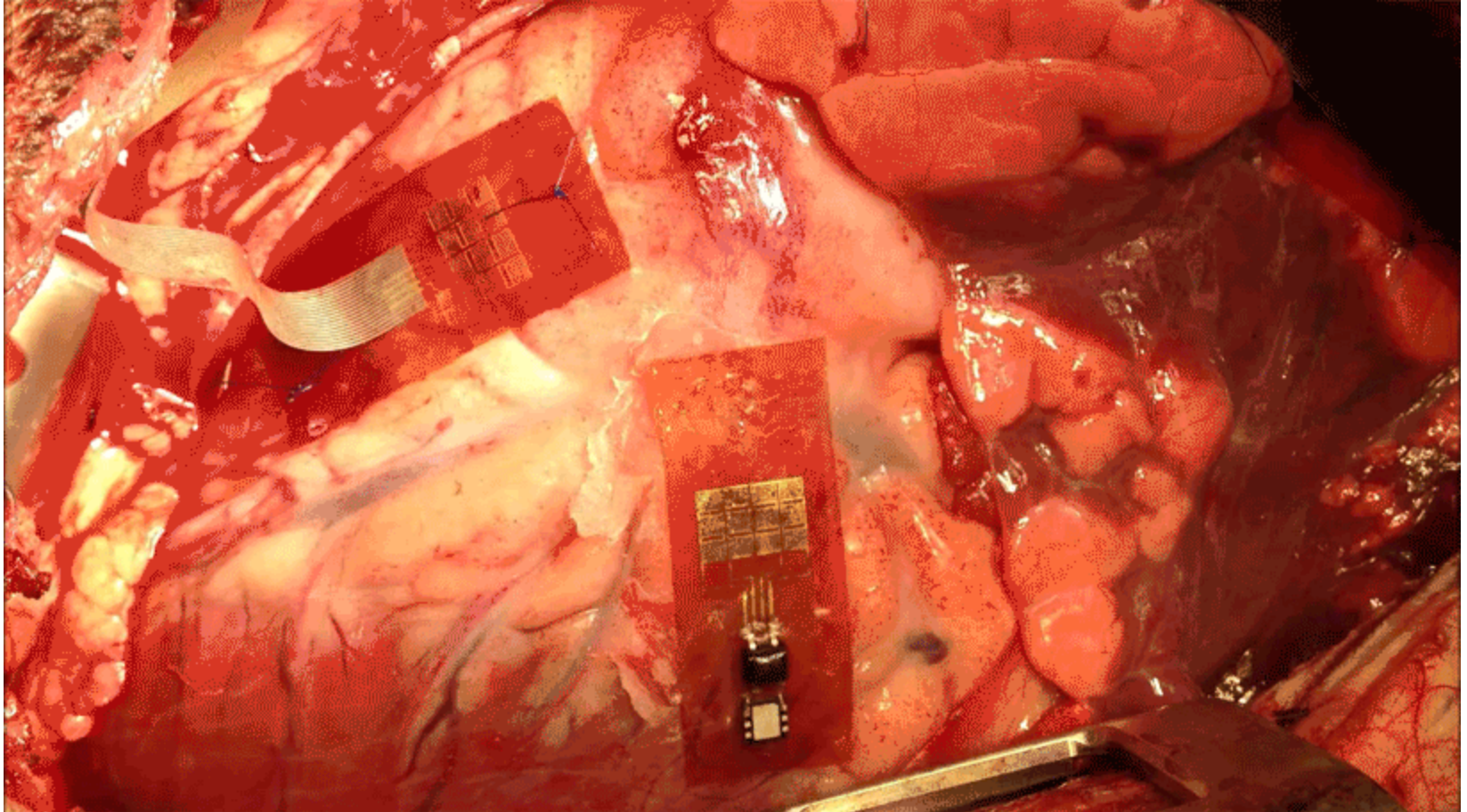




3.1.2019 г.







3.1.2019 г.



3.1.2019 г.

Operational characteristics and scaling trends for piezoelectric actuators

Figures of merit	Nonresonant actuators			Resonant actuators
	Stack	Benders	Inchworm	TWUM
Force, $F$	$10^2 - 10^5$ N	$10^{-2} - 10^2$ N		Torque $\leq 10^4$ Nm
Displacement, $S$	0.1–0.6% (dynamic up to 1.7%)	$10^{-2} - 10$ mm	Unlimited	Unlimited
Work density, $W_V$	$\approx 10^{-2}$ J/cm <sup>3</sup>	$10^{-4} - 10^{-2}$ J/cm <sup>3</sup>	$\approx 10^{-3}$ J/cm <sup>3</sup>	$10^{-3} - 10^{-2}$ J/cm <sup>3</sup>
Power density, $P_V$	$10^2 - 10^4$ W/cm <sup>3</sup>	$10^{-1} - 10^1$ W/cm <sup>3</sup>	$\approx 10^{-4}$ W/cm <sup>3</sup>	$\approx 10^{-1}$ W/cm <sup>3</sup>
Bandwidth, $f$	$\leq 10^5$ Hz	$\leq 10^3$ Hz	$\leq 10^2$ Hz	$\leq 10^2$ Hz
Efficiency, $\eta$	70–90%			
Scaling trends				
<i>Force</i>	$F \propto L^2$			
<i>Stroke</i>	$S \propto L$			
<i>Work per cycle</i>	$W \propto L^3$			
<i>Energy density</i>	$W_V \propto L^0$			
<i>Bandwidth</i>	$f \propto L^{-1}$			
<i>Power density</i>	$P_V \propto L^{-1}$			

**Table 1.5** Main applications of piezoelectric devices

Linear actuator	Bending actuator	Generator sensor	Transformer sensor/actuator
Fuel injection Printers Microscopes Micropositioning Nanopositioning Tunable lasers Ultrasonic motors Micro pumps Ultrasound scanners Droplet dispensing Hard disc drives Process control Mechatronics Optics Vibration control Ultrasound welding Ultrasound cleaning Stretching opt. fibers	Drug dispensers Valves Pumps Micropositioning Nanopositioning Textile machines Optics Micro pumps Vibration control Droplet dispensing Wire bonding Tunable lasers Mechatronics Optics Vibration control Telecommunication Moving opt. fibres	Accelerometers Force sensor Pressure sensor Knock sensors Gyroscopes Medical Gas ignition Sonars Medical scanners Blood flow meters Distance sensors	LCD backlighting Ion generators Power supplies

Гледайте в YouTube:

1. <https://www.youtube.com/watch?v=pmObNG-W6S0>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=rN3oWzDwGeQ>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=ZIUS6c5t8Js>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=yJnExTI3Hww>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=fHp95e-CwWQ&t=9s>
6. <https://www.youtube.com/watch?v=n3ihqjLKFSk>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=g50f9m6OHcM>
8. <https://www.youtube.com/watch?v=PMmutw8N2K8>
9. <https://www.youtube.com/watch?v=lgI41B7YNFs>
10. <https://www.youtube.com/watch?v=JBWBZ4nGnak>
11. <https://www.youtube.com/watch?v=tfWsKGzleEw>
12. <https://www.youtube.com/watch?v=mAAT5fvbl4Y>
13. <https://www.youtube.com/watch?v=wn9axv5NTGQ>
14. <https://www.youtube.com/watch?v=vcdJh-ELcRY>
15. <https://www.youtube.com/watch?v=Lwz3yf7e8kl>
16. [https://www.youtube.com/watch?v=ruSKLI\\_FQi0](https://www.youtube.com/watch?v=ruSKLI_FQi0)
17. <https://www.youtube.com/watch?v=joVQ29d4IB8>
18. <https://www.youtube.com/watch?v=FJC091BJzBc&t=419s>
19. <https://www.youtube.com/watch?v=6xHJYQreZnM>

# Литература

1. Xiaoning Jiang, Paul W. Rehrig, Wesley S. Hackenberger, Edward Smith, Shuxiang Dong,<sup>3</sup> Dwight Viehland<sup>3</sup> Jim Moore, Brian Patrick ***Advanced Piezoelectric Single Crystal Based Actuators***, Smart Structures and Materials 2005: Active Materials: Behavior and Mechanics, edited by William D. Armstrong, Proceedings of SPIE Vol. 5761
2. (SPIE, Bellingham, WA, 2005) · 0277-786X/05/\$15 · doi: 10.1117/12.600019)  
<https://informaticcoolstuff.wordpress.com/2015/09/12/electricity-by-applying-pressure-peizoelectricity/>
3. <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
4. Ioan Alexandru Ivan, Micky Rakotondrab, Roger Bourquin, Nicolas Chaillet, Philippe Lutz, Jean-Claude Poncot<sup>3</sup>, Roland Duffait and Olivier Bauer, Comparative material study between pzt ceramic and newer crystalline pmn-pt and pzn-pt materials for composite bimorph actuators, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 24(2010) 1-9.
5. Lecture 19, Piezoelectricity, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh ([www.pitt.edu/~qiw4/Academic/.../Lecture19b](http://www.pitt.edu/~qiw4/Academic/.../Lecture19b))

- 1] K. Uchino, „Piezoelectric Ultrasonic Motors: Overview,“ *Smart Materials and Structures*, том 7, pp. 273-285, 1998.
- 2] И. Костов, Кристаллография, 2 ред., "Наука и искусство", 1958, p. 412.
- 3] M. S. Vijaya, Piezoelectric Material and Devices, applications in Engineering and Medical Sciences, Taylor & Francis Groups, LLC, 2013, pp. 1-2.
- 4] P. Langevin, „Precede et appareil d’emission et de reception des ondes elastiques sousmarines a l’aide des proprietes piezoelectriques du quarta,“ *Fr. patent No 505703*, 1918.
- 5] W. G. Cady, „The piezoelectric resonator,“ *Proc. Inst. Rad. Eng.*, том 10, pp. 83-114, 1922.
- 6] В. Шарапов, М. Мусиненко и Е. Шарапова, Пьезоэлектрические датчики, Москва: Техносфера, 2006.
- 7] Z. Gianchandani, O. Tabata и H. Zappe, Comprehensive Microsystems, NJ: Elsvier Ltd, 2008, pp. 550-580.
- 8] J. Zeng, L. Wang, J. Goa, Z. Song, X. Zhu, C. Lin, L. Hou и E. Liu, „Structural and electrical characteristics of oriented  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$  ferroelectric thin films deposited on diamond substrates by a simple sol-gel process,“ *J Crystal Growth*, том 197, pp. 874-878, 1999.
- 9] J. Zhao, D.-Y. Park, M. J. Seo, C. S. Hwang, Y. K. Han, C. H. Yang и K. Y. Oh, „Metallorganic CVD of high-quality PZT thin films at low temperature with new Zr and Ti precursors having MMP ligands,“ *J Electrochem. Soc.*, том 151, pp. 283-201, 2004



- 10] Q. Wan, N. Zhang, L. Wang, Q. Shen и C. Lin, „Preparation of PZT on diamond by pulsed laser deposition with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer,“ *Thin Solid Films*, том 415, pp. 64-70, 2002.
- 11] J. P. Buchanan, Handbook of piezoelectric crystals for radio equipment designers, Philco Corporation, 1956.
- 12] J. Curie и P. Curie, „Contractions et dilations produits par des tensions electriques dans les cristaux hemiedres a faces inclines,“ *Compt. Rend.*, pp. 1137-1140, 2013.
- 13] Z. L. Wang и J. Song, „Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays,“ *Science*, том 312, pp. 242-246, 2006.
- 14] Z. L. Wang, „Splendid One-Dimensional Nanostructures of Zinc Oxide: A New Nanomaterial Family for Nanotechnology,“ *American Chemical Society*, том 2, № 10, pp. 1987-1990, 2008.
- 15] H. Ohigashi , K. Koga, M. Suzuki, T. Nakanishi, K. Kimura и N. Hashimoto, „Piezoelectric and ferroelectric properties of P (VDF-TrFE) copolymers and their application to ultrasonic transducers,“ *Feroelectrics*, том 60, № 1, pp. 263-276, 2011.
- 16] Z. Li, D. Deng и C. T. J. Carlson, „Piezoelectric Materials Used in Underwater Acoustic Transducers,“ *Sensor Letters*, том 10, № 3-4, pp. 49-58, 2012.
- 17] J.-H. Jeong, C. Kimura , . H. Aoki, . M. Okuyama и T. Sugino , „Formation and Characterization of P(VDF-TeFE) Films Using Sol-Gel Methods for Application to Micro-Generators,“ *ESC Trans.*, том 19, № 18, pp. 59-65, 2009.
- 18] J. S. Harrison и Z. Ounaies, „Piezoelectric Polymers,“ NASA Langley Research Center, Hampton, 2001.
- 19] A. J. Jain , S. Kumar и R. D. Mahapatra, „Development of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) films and its quasi-static and dynamic strain response,“ *Research&Reviews On Polymer*, том 4, № 3, pp. 104-112, 2013.

- 20] H. Kawai, „The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride),“ *Japanese Journal of Applied*, том 8, № 7, 1969.
- 21] J. G. Bergman, J. H. McFee и G. R. Crane, „Pyroelectricity and optical second harmonic generation in polyvinylidene fluoride films,“ *Applied Physics Letters*, том 18, № 5, pp. 203-205, 1971.
- 22] T. Muzino, M. Ohta и M. Segawa, „Doubly oriented film of polyvinylidene fluoride“. USA Патент US4298719, Nov. 1981.
- 23] Betz R., „The advantages of bioriented piezo-electric film,“ *Ferroelectrics*, том 75, № 1, pp. 397-404, 1987.
- 24] P. Ueberschlag, „PVDF piezoelectric polymer,“ *Sensor Review*, том 21, № 2, pp. 118-126, 2001.
- 25] B. Gusarov, „PVDF piezoelectric polymers : characterization and application to thermal,“ Universite Grenoble Alpes, Dissertation, Grenoble, 2015.
- 26] R. Moheimani и A. J. Fleming, Piezoelectric transducers for vibration control and damping, London: Springer-Verlag, 2006.
- 27] C. R. Fuller, S. J. Elliot и P. A. Nelson, Active Control of Vibration, Academic Press, 1996.
- 28] A. Preumont, Mechatronics Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems, Springer, 2006.
- 29] P. I. (. G. & C. KG, *CAT128E Piezoelectric Actuators 12/06/08 .0,1*, 2012.

- 30] J. L. Pons, *Emerging Actuator Technologies A Micromechatronic Approach*, John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- 31] I. A. Ivan, M. Rakotondrab, R. Bourquin, N. Chaillet, P. Lutz, J. C. Poncot, R. Duffait и O. Bauer, „Comparative material study between pzt ceramic and newer crystalline pmn-pt and pzn-pt materials for composite bimorph actuators,“ *Rev. Adv. Mater.Sci.* , том 24, pp. 1-9, 2010.
- 32] P. Dineva, D. Gross, R. Miller и T. Rangelov, *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials, Solid Mechanics and Its Applications*, Springer, 2014.
- 33] T. Minoru, E. Van Volkenburgh, M. Mizunami и S. Nomura, *Bio-inspired designs of sensors, actuators*, Cambridge University Press , 2016.
- 34] Т. С. Тодоров, МЕМС: Проектиране и приложение. Част 1: Основни енергийни преобразувания, ТУ-София, 2013.
- 35] S. Sherrit, M. Badescu, Y. Bar-Cohen, X. Bao и H. J. Lee, „Piezoelectric Actuated Inchworm Motor (PAIM),“ *Tech Briefs*, том 1, 2015.
- 36] S. Park, E. Yoon, s. Lee, H. Shin, H. Park, B. Kim, D. Kim, j. Park и S. Park, „The development of a PZT-based microdrive for neural signal recording,“ *Smart Material and Structures*, том 17, № 2, p. 027001, 2008.
- 37] T. Higuchi, Y. Yamagata, K. Furutani и K. Kudoh, „Precise positioning mechanism utilizing rapid deformations of piezoelectric elements,“ *Proc. of IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. pp.47-51, 1990.
- 38] Cerdat и Technologies, „Products Catalogue Version 4.1,“ 2012.
- 39] PiezoDrive, „AP Series Amplified Piezoelectric Actuators,“ PiezoDrive, 2018. [Онлайн]. Available: <https://www.piezodrive.com/>. [Отваряно на 19 2 2018].

- S. D. Senturia, *Microsystem design*, New York, London, Boston, Dordrecht, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 41] S.-S. Lih, Y. Bar-Cohen и W. Grandia, „Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves,“ в *International Conference, Smart Structures and Materials Symposium, Enabling Technologies: Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego, CA, 1997.
- 42] K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*, New York: Dover Publications, 1975.
- 43] Murata Manufacturing Co., Ltd., „Murata Manufacturing Co., Ltd. All Rights Reserved,“ Murata Manufacturing Co., Ltd., 2018. [Онлайн]. Available: <https://www.murata.com/about/newsroom/techmag/metamorphosis15/customer/topics02>. [Отваряно на 01 04 2018].
- 44] P. Yu, W. Liu, C. Gu, X. Cheng и X. Fu, „Flexible Piezoelectric Tactile Sensor Array for Dynamic Three-Axis Force Measurement,“ *Sensors*, том 16, № 819, 2016.
- 45] D. A. Russel, „Acoustics and Vibration Animations,“ 05 08 2016. [Онлайн]. Available: <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>. [Отваряно на 2 4 2018].
- 46] D. Morgan, *Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing*, Elsevier Ltd., 2007.
- 47] Н. Campanella, *Acoustic Wave and Electromechanical Resonators Concept to Key Applications*, Boston, London: Artech House, 2010.
- 48] О. Л. Балышев, „АКУСТОЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА,“ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 30 05 2014. [Онлайн]. Available: <http://jre.cplire.ru/jre/jun14/2/text.html>. [Отваряно на 5 4 2018].
- 49] S. Thomas, M. Cole, F. H. Vila-Lopez и J. W. Gardner, „High frequency surface acoustic wave resonator-based sensor for particulate matter detection,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, том 224, № 15, pp. 138-145, 2016.

- 50] S. Sethi, „FBAR Gets Excellent Reception,“ The Linley Group, 2018. [Онлайн]. Available: <http://www.linleygroup.com/mpr/article.php?id=11440>. [Отваряно на 06 04 2018].
- 51] D. Chen, Z. Zhang, J. Ma и W. Wang, „ZnO Film Bulk Acoustic Resonator for the Kinetics Study of Human Blood Coagulation,“ *Sensors*, том 17, № 5, 2017.
- 52] П. Томов и А. Ангелов, „Ултразукови сензори сравнение, типове, специфика, методи за измерване,“ в *XX МНТК "АДП-2011"*, София, 2011.
- 53] X. Kang, D.-G. Zhang и M. Jiang, „Size Effect on Dynamic Characteristics of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers,“ *Journal of Applied Science and Engineering*, том 15, № 4, pp. 353-362, 2013.
- 54] H.-Y. Tang, „Interface Electronics for Ultrasonic Transducers,“ University of California at Berkeley, 2017.



Благодаря за вниманието!