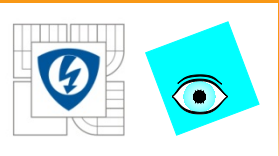


PIEZOELEKTRICKÁ KERAMIKA

2.12.2011

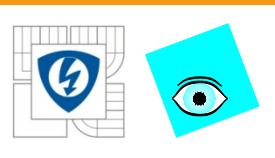
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





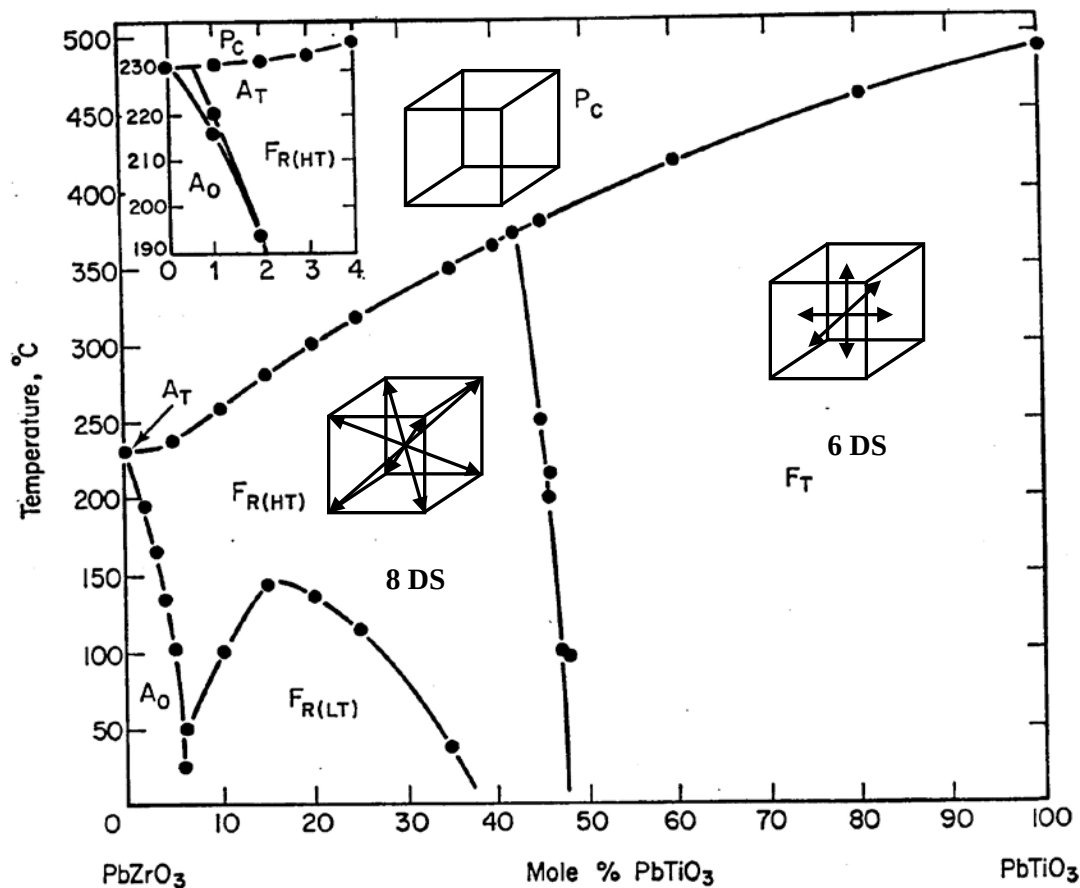
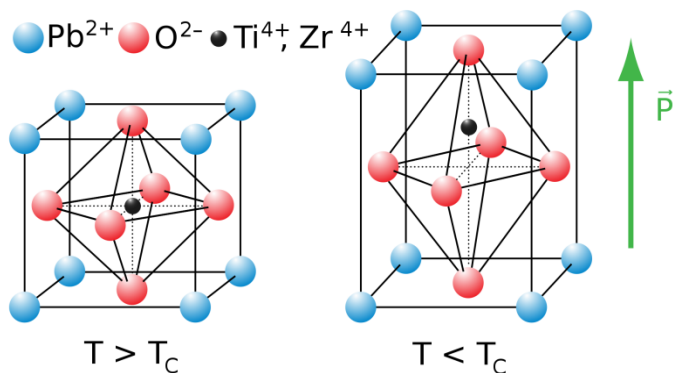
Osnova

- Struktura, fázový diagram
- Chemické složení
- Feroelektrické vlastnosti
- Materiálové vlastnosti
- Limity použitelnosti



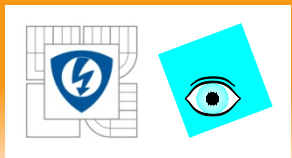
Piezelektrická keramika

PZT keramika –



2.12.2011

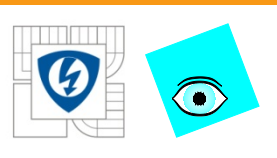
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Směs fází na úrovni základních buněk krystalové mřížky
Koexistence dvou fází na morfotropní fázové hranici
(MPB)

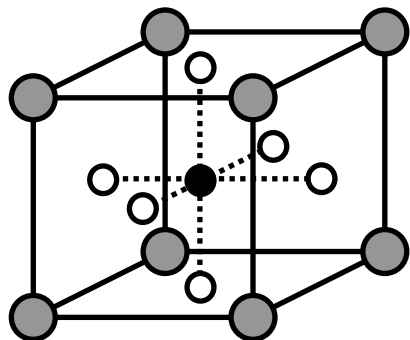
Obě fáze mají feroelektrické vlastnosti

Dopování – isovalentní nebo heterovalentní ionty



Modifikace PZT keramiky

A-pozice nebo B-pozice



A^{2+}

isovalentní Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+}



B^{4+}

Sn^{4+}



O^{2-}

1-5%

Table 4.2. Modification of PZT by substitution of Sr^{2+} ions in $Pb_{1-x}Sr_xZr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$

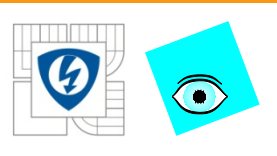
x	$T_C, ^\circ C$	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	k_p
0	385	544	0.48
0.01	—	584	0.49
0.05	360	1,002	0.50
0.10	328	1,129	0.59
0.125	290	1,237	0.47
0.15	265	1,260	0.43
0.20	242	1,257	0.34

G.Helke, K.Lubitz: Piezoelectric PZT ceramics, in Piezoelectricity, Springer Verlag 2008

2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Modifikace PZT keramiky

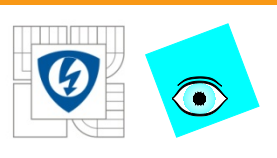
Heterovalentní dopování – generace kyslíkových nebo olovnatých vakancí

Table 4.3. Substitution of heterovalent ions in the perovskite lattice

Designation	Small ions: B ⁴⁺ -positions		Large ions: A ²⁺ -positions	
	Ion	Ion radius ^a	Ion	Ion radius*
PZT	Ti ⁴⁺	0.68	Pb ²⁺	1.20
	Zr ⁴⁺	0.80	Sr ²⁺	1.13
Donors, “softener”	Nb ⁵⁺	0.70	La ³⁺	1.22
	Sb ⁵⁺	0.62	Bi ³⁺	0.96
	W ⁶⁺	0.68	Nd ³⁺	1.04
Acceptors, “hardener”	Mn ²⁺	0.80	K ⁺	1.33
	Fe ³⁺	0.64	Ag ⁺	1.26
	Al ³⁺	0.50		

^aIon radius in 10⁻¹⁰ m

G.Helke, K.Lubitz: Piezoelectric PZT ceramics, in Piezoelectricity, Springer Verlag 2008



„Hard“ a „soft“ PZT

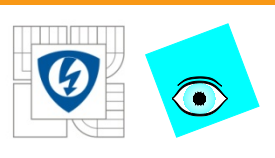
Dopování heterovalentními ionty mění materiálové vlastnosti

Table 4.4. Modification of PZT with donor and acceptor material

	Dopant	$T_C, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$\tan \delta, 10^{-3}$	k_p	$d_{33}, \text{pC/m}$	Q_m
	soft						
(1)	Nb^{5+}	365	1700	15	0.60	374	85
(2)	Sb^{5+}	>350	1510	15	0.46	410	95
(3)	Nd^{3+}	330	1600	20	0.60	355	100
	hard						
(4)	Fe^{3+}	300	820	4	0.59	240	500
(5)	Ni^{3+}	330	1000	8	0.50	200	350

(1) $\text{Pb}_{0.98}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{Nb}_{0.024})\text{O}_3$, (2) $\text{Pb}_{0.96}\text{Sr}_{0.05}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.46}\text{Sb}_{0.02})\text{O}_3$ [42],
 (3) $\text{Pb}_{0.97}\text{Nd}_{0.02}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3$ [43], (4) $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.525}\text{Ti}_{0.472}\text{Fe}_{0.003})\text{O}_3$ [44],
 (5) $\text{Pb}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}[(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.44})\text{Ni}_{0.04}]\text{O}_3$ [42]

G.Helke, K.Lubitz: Piezoelectric PZT ceramics, in Piezoelectricity, Springer Verlag 2008



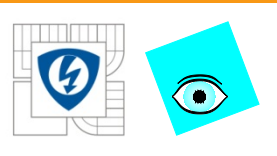
Komplexní tuhé roztoky

Tří a vícesložkové systémy



Table 4.6. Composition of complex compounds [1, 10, 54, 55, 62]

Complex compounds	Ions	
$(\text{A}^{1+}_{1/2}\text{A}^{3+}_{1/2})\text{TiO}_3$	A^{1+}	Li, Na, K, Ag
	A^{3+}	Bi, La, Ce, Nd
$\text{Bi}(\text{B}^{2+}_{1/2}\text{Mn}_{1/2})$	B^{2+}	Sr, Zn, Ni
$\text{A}^{2+}(\text{B}^{1+}_{1/4}\text{B}^{5+}_{3/4})\text{TiO}_3$	A^{2+}	Pb, Sr
	B^{1+}	Li, K, Ag
$\text{Pb}(\text{B}^{2+}_{1/3}\text{B}^{5+}_{2/3})\text{TiO}_3$	B^{2+}	Mg, Ni, Zn, Mn, Co, Fe, Cu
$\text{Pb}(\text{B}^{3+}_{1/2}\text{B}^{5+}_{1/2})\text{TiO}_3$	B^{3+}	Mn, Sb, Al, Fe, Co, Yb, In
	B^{5+}	Nb, Sb, Ta
$\text{Pb}(\text{B}^{3+}_{2/3}\text{B}^{6+}_{1/3})\text{TiO}_3$	B^{6+}	W, Te, Re
$\text{Pb}(\text{B}^{2+}_{1/2}\text{B}^{6+}_{1/2})\text{TiO}_3$		



Další keramické systémy

BaTiO_3 (BT)

Lead metaniobate - PbNb_2O_6

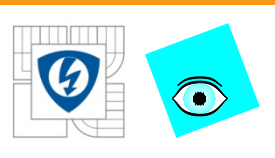
$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ – Aurivilliovské struktury

$(\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})\text{TiO}_3$ – NBT

$(\text{K}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})\text{TiO}_3$ – KBT

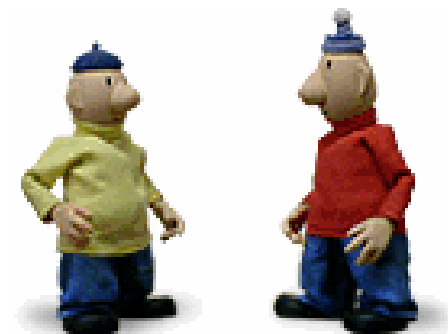
NBT-BT, KBT-BT

Tuhé roztoky s MPB patří k nejúspěšnějším složením keramik



Polarizace PZT keramiky

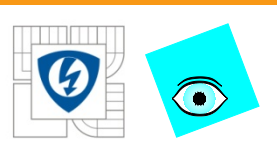
Intenzita elektrického pole 2-4kV/mm, při teplotách 120-140°C



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





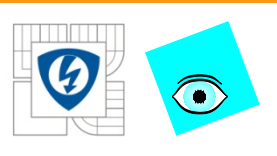
Průměrování směru polarizace

Spontánní polarizace v zrnech – libovolná orientace, která se přeorientovává v poli

Průměrný
dipólový
moment

RELATIONSHIP BETWEEN IDEAL SINGLE CRYSTAL POLARIZATION P_S
AND EXPECTED CERAMIC POLARIZATION $\bar{P}$ FOR SOME
REPRESENTATIVE FERROELECTRICS.

Symmetry Change Associated with Ferroelectricity	Polarization Directions	Number of Equivalent Directions	$\frac{\bar{P}}{P_S}$
$2/m \rightarrow 2$	$\langle 010 \rangle$	2	0.5
$m3m \rightarrow 4mm$	$\langle 100 \rangle$	6	0.831
$m3m \rightarrow mm2$	$\langle 110 \rangle$	12	0.912
$m3m \rightarrow 3m$	$\langle 111 \rangle$	8	0.866



Symetrie pro materiál keramiky

Obecně to může být libovolný feroelektrický materiál

Nejúspěšnější je perovskitová struktura

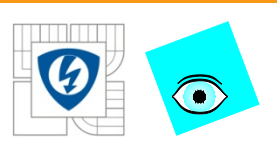
Minerál perovskit CaTiO_3 , druh $m\bar{3}m \rightarrow 4mm$

Perovskitová keramika – tuhé roztoky -Morfotropní
fázová hranice (MPB)

$$m\bar{3}m \rightarrow 4mm$$

$$m\bar{3}m \rightarrow mm2$$

$$m\bar{3}m \rightarrow 3m$$



Piezoelektrická keramika

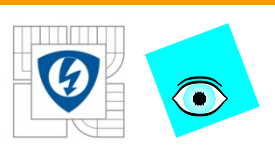
Elektromechanické tenzory – třída symetrie ∞mm ,
směr polarizace 3

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

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (0 \quad 0 \quad p_3)$$

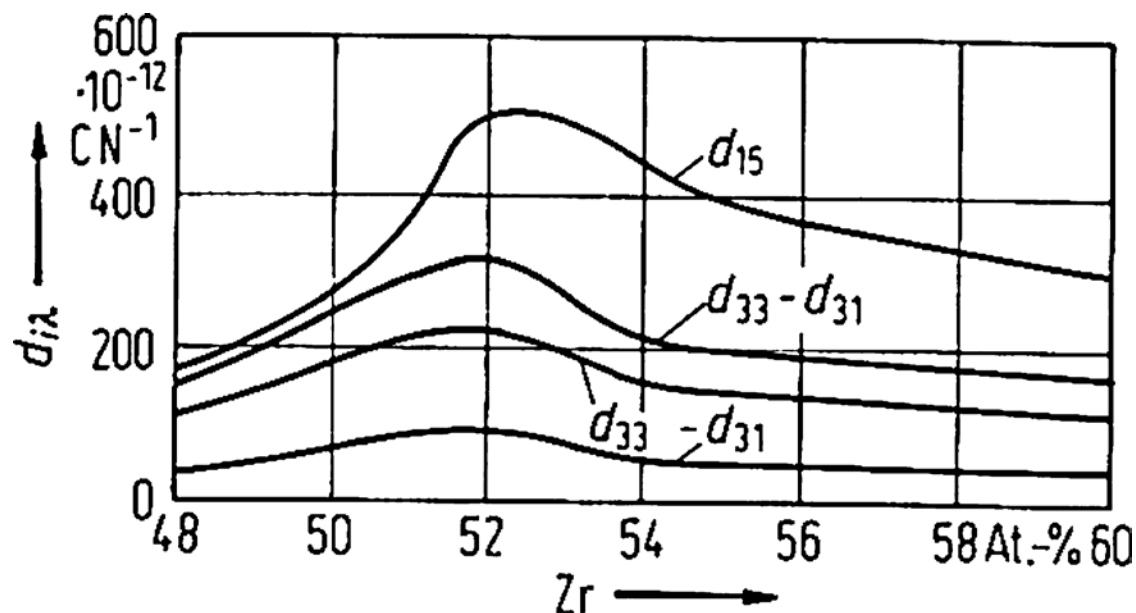
$$\begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix}$$

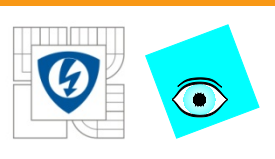
$$s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$



Materiálové vlastnosti PZT

Nejlepší na materiálové vlastnosti je složení v blízkosti MPB, nejlepší polarizovatelnost



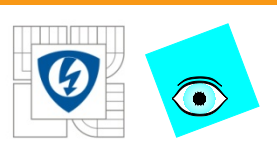


Vlastnosti soft a hard PZT

Table 7.14 Material data for selected piezoelectric ceramics available commercially. Pz24 and Pz29 are trademarks of Ferroperm Piezoceramics A/S (Denmark); N-8 and N-10 (NEPEC®NPM) are trademarks of Tokin (Japan); Vibrit 1100 and Vibrit 202 are trademarks of Siemens (Germany); PZT5H and PZT8 are trademarks of Morgan Matroc, Ltd. (UK); APC841 and APC856 are trademarks of American Piezo Ceramics International, Ltd. (USA)

		soft PZT					hard PZT				
Property		Pz29	N-10	Vibrit 1100	PZT 5H	APC 856	Pz24	N-8	Vibrit 202	PZT 8	APC 841
s_{11}^E	10^{-12}Pa^{-1}	17.0	14.8	14.20	16.4	15.0	10.4	11.2	11.80	11.5	11.7
s_{12}^E		-5.78		-3.70			-3.01		-4.50		
s_{13}^E		-8.79		-6.50			-7.58				
s_{33}^E		22.9	18.1	20.60	20.8	17.0	23.4	15.2	13.80	13.5	17.3
s_{44}^E		54.1		43.00			23.0		31.00		
ε_{11}^T	ε_0	2440	5000	4750			810	1450		1290	
ε_{33}^T		2870	5440	4500	3400	4100	407	900	1000	1100	1350
k_p	%	64.3	50	70	65.0	65	50.1	56	50	51.0	60
k_t		52.4	62	50			52.0	52			
k_{31}		36.96	34	42	39.0	36	29.8	34	28	30.0	33
k_{33}		75.23	68	71	75.0	73	66.9	67	60	64.0	68
k_{15}		67.07	66	67	68.0	65	32.7	78	57	55.0	67
d_{31}	10^{-12}CN^{-1}	-243	-287	-315	-274	-260	-57.8	-99	-90	-97	-109
d_{33}		574	635	640	593	620	194	226	205	225	275
d_{15}		724	930	895	741	710	151	652	295	300	450
d_h		88.2			45		78.4			31	
θ_C	$^{\circ}\text{C}$	235	145	177	195	150	330	320	330	300	320
ρ	kgm^{-3}	7460	8000	8100	7450	7500	7700	7720	7700	7600	7600
$\tan\delta$	%	1.6	1.0	2.5	2.5	2.7	0.2	0.4	0.7	0.2	0.35
Q_m	1	49	70	50	65	72	370	1600	800	1000	1400

J.Tichý, J.Erhart, E.Kittinger, J.Přivratská: Fundamentals of Piezoelectric Sensorics, Springer Verlag 2010

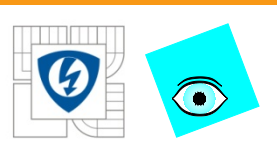


Vlastnosti jiných piezoelektrických keramik

Table 7.16 Material properties of selected non-PZT ceramic materials. Pz34, Pz35 and Pz46 are trademarks of Ferroperm Piezoceramics A/S (Denmark)

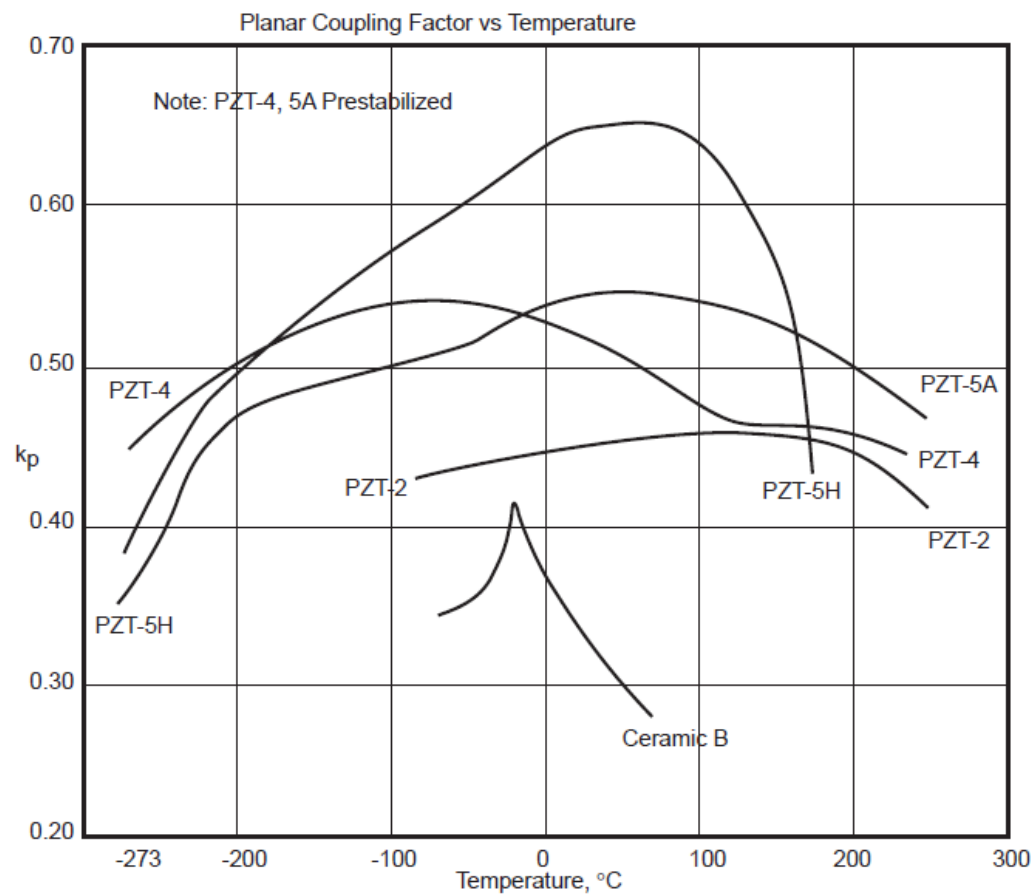
Property		Pz34 doped PbTiO ₃	Pz35 lead metaniobate	Pz46 bismuth titanate	BaTiO ₃ ceramics
s_{11}^E	10^{-12}Pa^{-1}	7.33		10.6	8.55
s_{12}^E		-1.61		-2.28	-2.61
s_{13}^E		-0.536		-12.0	-2.85
s_{33}^E		7.31		44.2	8.93
s_{44}^E				26.2	23.3
ε_{11}^T	ε_0			127	
ε_{33}^T		208	219	124	1350/1700
k_p	%	7.4		3.3	37.8
k_t		40.9	33.6	24.9	
k_{31}		4.59		2.09	20.8
k_{33}		39.66		8.67	49.3
k_{15}				4.53	47.6
d_{31}	10^{-12}CN^{-1}	-5.33		-2.26	-79
d_{33}		46.0	83.0	19.1	191
d_{15}				7.79	270
d_h		35.3		14.6	
Θ_C	$^{\circ}\text{C}$	400	500	650	130
ρ	kgm^{-3}	7550	5720	6530	
$\tan\delta$	%	1.4	0.6	0.4	
Q_m	1	314	17	465	

J.Tichý, J.Erhart, E.Kittinger,
J.Přivratská: Fundamentals of
Piezoelectric Sensorics, Springer Verlag
2010



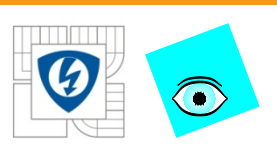
Teplotní závislosti vlastností

Morgan Electroceramics, UK



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

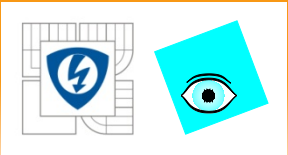


Limity aplikovatelnosti

- Teplota ($T < T_C$) – depolarizace pyroelektrickými náboji
- Mechanický tlak
- Elektrické pole ($E < E_C$)
 - Paralelní
 - Antiparalelní
 - Kolména směr polarizace

Table 7.15 Applicability limits for the electric field and mechanical stress for selected PZT types (PXE[®] is registered trademark of Philips)

Material grade	E_m [Vmm ⁻¹]	T_m [MPa]
PXE 59	350	5
PXE 5	300	2.5
PXE 52	100	—
PXE 41	300	10
PXE 42	400	25
PXE 43	500	35

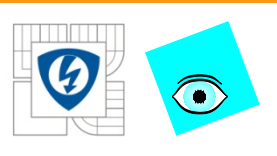


PIEZOELEKTRICKÉ KERAMICKÉ REZONÁTORY A AKTUÁTORY

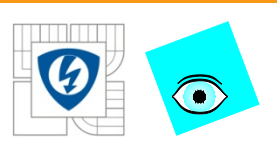
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



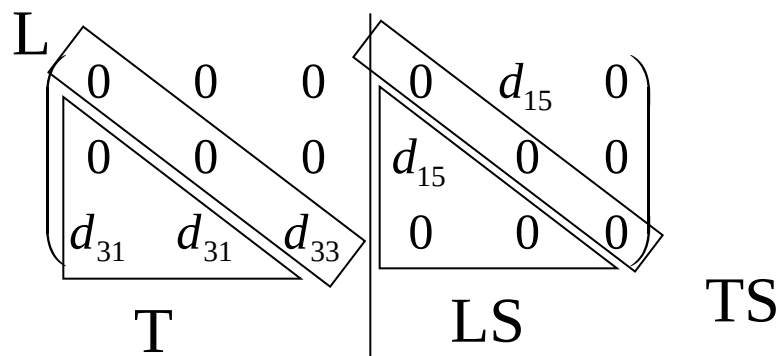


- **Vibrační mód rezonátoru**
- **Náhradní obvod a impedance rezonátoru**
 - Statická a dynamická
- **Rezonátory pro měření materiálových vlastností**
 - tyčinka, deska, disk
 - vibrační módy
- **Jiné speciální rezonátory**
- **Aktuátory**
 - Bimorf a unimorf
 - jiné ohybové aktuátory
 - mnohovrstvé struktury

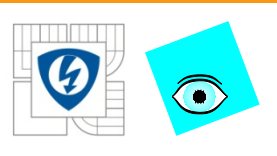


Vibrační mód rezonátoru

- Tvar rezonátoru
- Krystalografická symetrie materiálu (keramika ∞mm)
- Vzor elektrod
- Směr polarizace keramiky



$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k$$



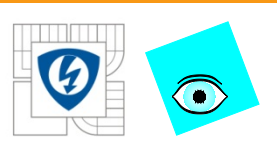
Piezoelektrická keramika

Elektromechanické tenzory – třída symetrie ∞mm ,
směr polarizace 3

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (0 \quad 0 \quad p_3)$$

$$s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$$



Volba stavových veličin

Příklad: piezoelektrický jev

$$S_{\mu} = s_{\mu\nu}^E T_{\nu} + d_{k\mu} E_k$$

$$D_i = d_{i\nu} T_{\nu} + \varepsilon_{ik}^T E_k$$

$$T_{\mu} = c_{\mu\nu}^E S_{\nu} - e_{k\mu} E_k$$

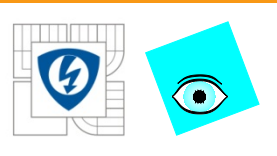
$$D_i = e_{i\nu} S_{\nu} + \varepsilon_{ik}^S E_k$$

$$S_{\mu} = s_{\mu\nu}^D T_{\nu} + g_{k\mu} D_k$$

$$E_i = -g_{i\nu} T_{\nu} + \beta_{ik}^T D_k$$

$$T_{\mu} = c_{\mu\nu}^D S_{\nu} - h_{k\mu} D_k$$

$$E_i = -h_{i\nu} S_{\nu} + \beta_{ik}^S D_k$$



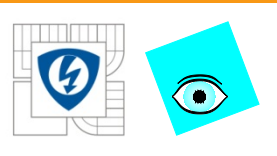
Tenzorová a maticová notace

- Elastické vlastnosti $c_{\alpha\beta} = c_{ijkl} \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$

$$s_{\alpha\beta} = \begin{cases} s_{ijkl} & \alpha, \beta = 1, 2, 3 \\ 2s_{ijkl} & \alpha = 1, 2, 3; \beta = 4, 5, 6 \\ 4s_{ijkl} & \alpha, \beta = 4, 5, 6 \end{cases}$$

- Piezoelektrické vlastnosti $d_{i\alpha} = \begin{cases} d_{ijk} & \alpha = 1, 2, 3 \\ 2d_{ijk} & \alpha = 4, 5, 6 \end{cases}$
 $e_{i\alpha} = e_{ijk} \quad \alpha = 1, 2, \dots, 6$

tensor	11	22	33	23,32	13,31	12,21
matrix	1	2	3	4	5	6



Pohybová a Maxwellova rovnice

Pohybová rovnice

bez objemových sil

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$$

$$f_i = 0$$

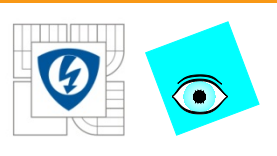
Maxwellova rovnice

bez volných nábojů (izolátor)

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = \rho_{free}$$

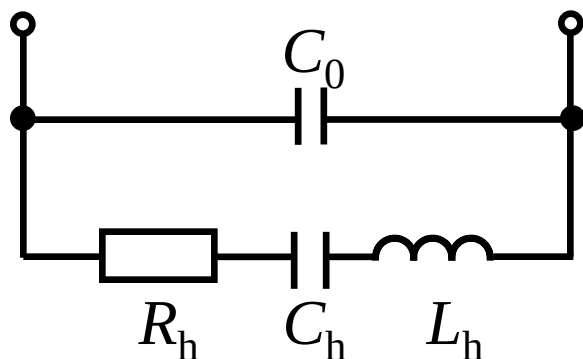
$$\rho_{free} = 0$$

+okrajové podmínky a systém deformace a napětí



Náhradní obvod v rezonanci

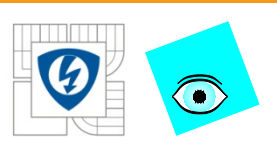
- Staticky – kapacitance
- Dynamicky – kapacitance měnící se na induktanci, rezonance



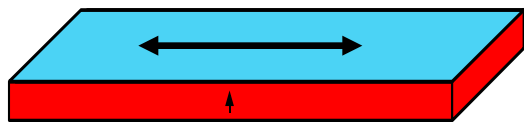
paralelní větve obvodu pro každou rezonanci

rezonance $Y \rightarrow \infty, Z \rightarrow 0$

antirezonance $Y \rightarrow 0, Z \rightarrow \infty$

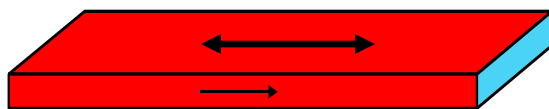


Standardní rezonátory

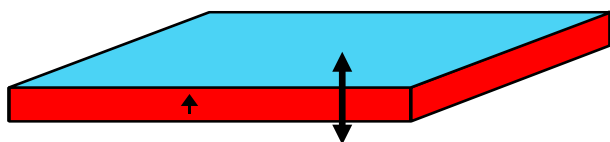


$$(l/t)^2 > 10, (l/w)^2 > 10$$

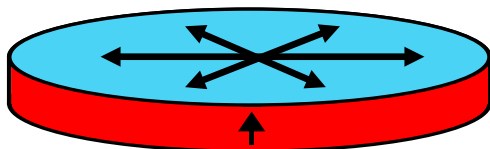
$$w/t > 2$$



$$(l/t)^2 > 10, (l/w)^2 > 10$$

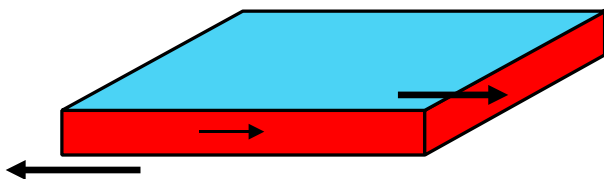


$$a/t > 10$$



$$d/t > 20$$

$$d/t > 40, \text{ pro harmonické}$$



$$l/t > 10$$

ANSI/IEEE

Std 176-1987

IEEE Standard on
Piezoelectricity

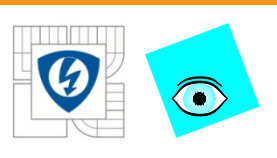
IRE Std.1961

Measurements of
Piezoelectric ceramics

2.12.2011

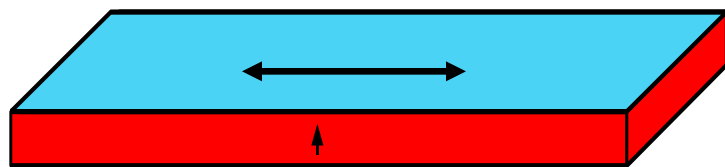
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



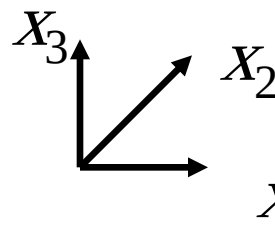


Příčné vibrace tenké tyčinky

Napěťový systém



$$T_1 \neq 0, T_\mu = 0$$



$$\eta = \omega l \sqrt{\rho s_{11}^E}$$

$$C_0 = \varepsilon_{33}^T \frac{2lw}{t}$$

Rezonance

$$Y = j\omega C_0 \left[1 - k_{31}^2 + k_{31}^2 \frac{\tan(\eta)}{\eta} \right]$$

2l délka, 2w šířka,
2t tloušťka

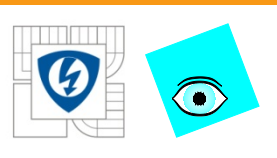
piezoelektricky volné

„overtones are harmonics“

$$\tan(\eta_r) \rightarrow \infty$$

Koeficient elektromechanické vazby

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T}$$

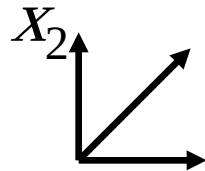


Podélné vibrace tenké tyčinky

Napěťový systém



$$T_3 \neq 0, T_\mu = 0$$



$$\eta = \omega l \sqrt{\rho s_{33}^D}$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0 (1 - k_{33}^2)} \left[1 - k_{33}^2 \frac{\tan(\eta)}{\eta} \right]$$

$$C_0 = \varepsilon_{33}^T \frac{2wt}{l}$$

x_3 2l délka, 2w šířka,
2t tloušťka

Rezonance

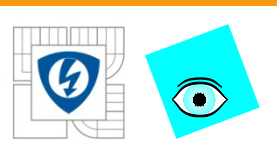
piezoelektricky vázané

„overtones are not harmonics“

$$\tan(\eta_r) = \frac{1}{k_{33}^2} \eta_r$$

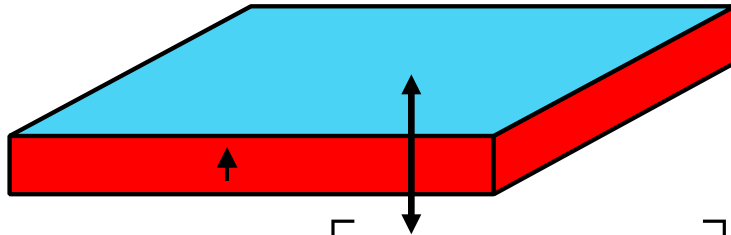
Faktor elektromechanické vazby

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \varepsilon_{33}^T}$$



Tloušťkově rozpínavé vibrace tenké desky

Napěťový systém



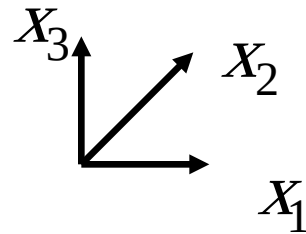
$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - k_t^2 \frac{\tan(\eta)}{\eta} \right]$$

Rezonance

$$\tan(\eta_r) = \frac{1}{k_t^2} \eta_r$$

Faktor elektromechanické vazby

$$T_1, T_2, T_3 \neq 0, T_\mu = 0; S_3 \neq 0, S_\mu = 0$$



$$\eta = \omega t \sqrt{\frac{\rho}{C_{33}^D}}$$

$$C_0 = \varepsilon_{33}^S \frac{2wl}{t}$$

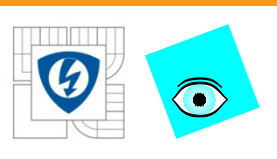
2l délka, 2w šířka,

2t tloušťka

piezoelektricky vázané

„overtones are not harmonics“

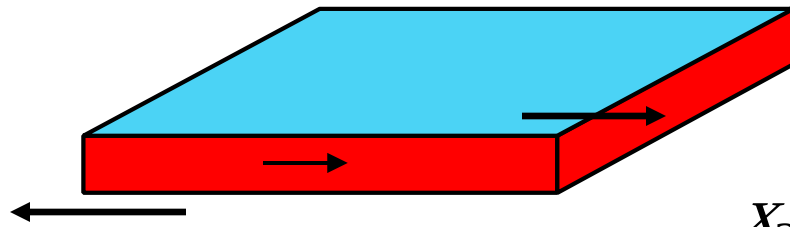
$$k_t^2 = \frac{e_{33}^2}{C_{33}^D \varepsilon_{33}^S}$$



Tloušťkově střížné vibrace tenké desky

Napěťový systém

$$T_5 \neq 0, T_\mu = 0$$



$$\eta = \omega t \sqrt{\rho s_{55}^D}$$

$$C_0 = \varepsilon_{11}^S \frac{2wl}{t}$$

2l délka, 2w šířka,
2t tloušťka

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - k_{15}^2 \frac{\tan(\eta)}{\eta} \right]$$

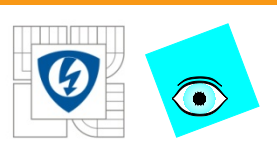
Rezonance

$$\tan(\eta_r) = \frac{1}{k_{15}^2} \eta_r$$

Faktor elektromechanické vazby

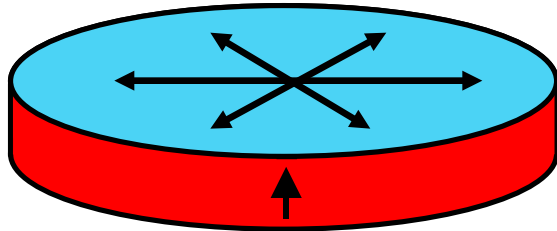
piezoelektricky vázané
„overtones are not harmonics“

$$k_{15}^2 = \frac{d_{15}^2}{s_{55}^E \varepsilon_{11}^T}$$



Radiální vibrace tenkého disku

Napěťový systém



$$T_r \neq 0, T_\mu = 0$$

x_3
 x_2
 x_1 průměr $2r$, tloušťka $2t$

Rezonance

$$Y = j\omega C_0 \left[2(k^P)^2 \frac{J_1(\eta)}{(1 - \sigma^P)J_1(\eta) - \eta J_0(\eta)} - 1 \right]$$

$$\frac{\eta_r J_0(\eta_r)}{J_1(\eta_r)} = 1 - \sigma^P$$

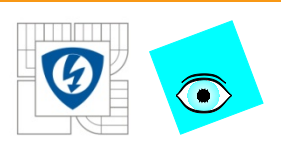
piezoelektricky volné,

„overtones are not harmonics“

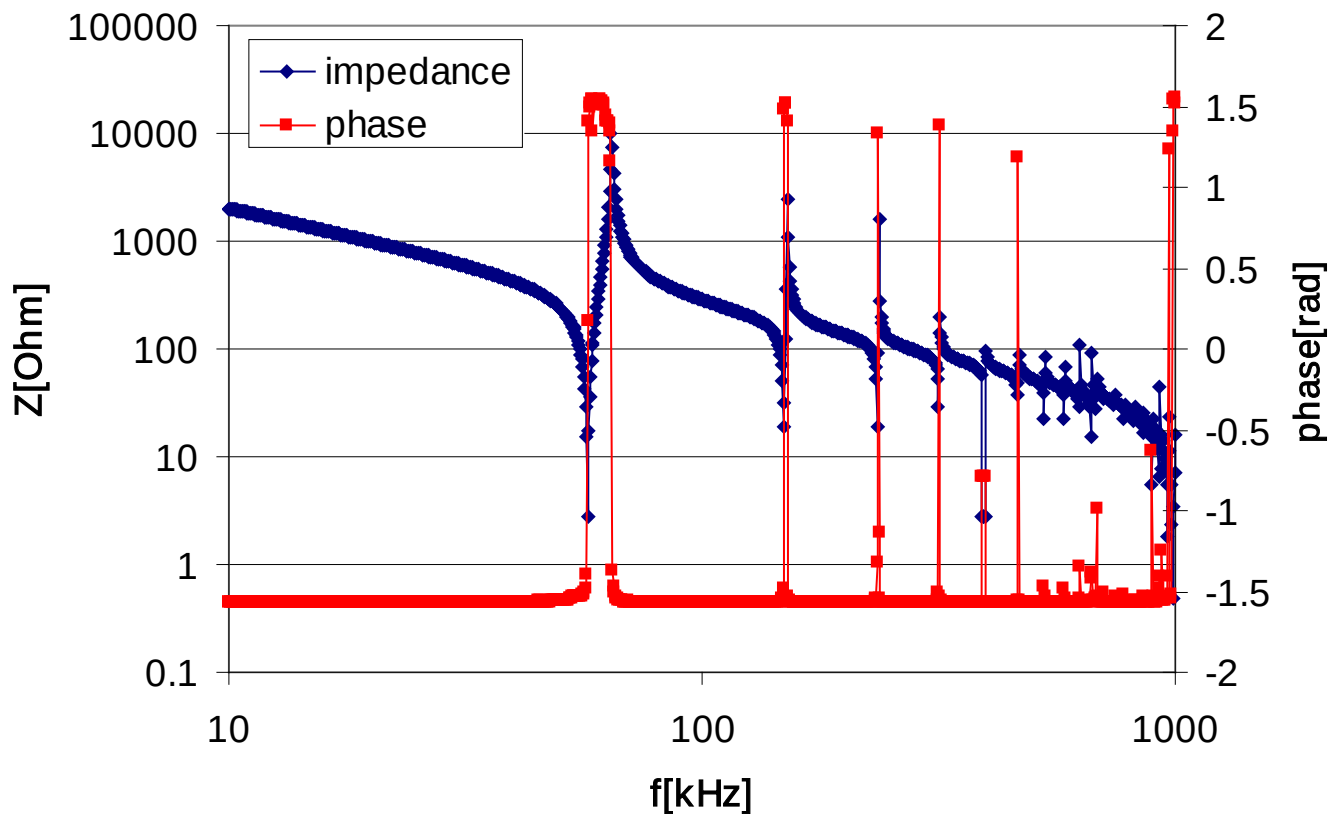
$$\eta = 2\pi fr \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}^P}}, C_0 = \frac{\pi r^2 \varepsilon_{33}^P}{2t}$$

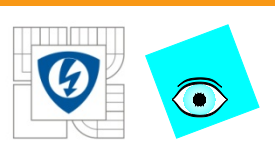
$$c_{11}^P = c_{11}^E - \frac{(c_{13}^E)^2}{c_{33}^E}, e_{31}^P = \frac{d_{31}}{s_{11}^E + s_{12}^E},$$

$$\varepsilon_{33}^P = \varepsilon_{33}^T (1 - k_p^2), (k^P)^2 = \frac{2(e_{31}^P)^2}{c_{11}^P \varepsilon_{33}^P}$$



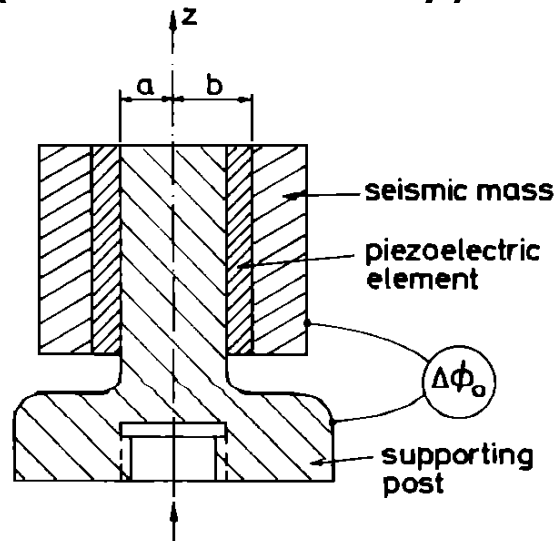
Disc, PZT APC841, D=40mm, t=2,2mm





Jiné speciální rezonátory

Např. tloušťkově střížné vibrace tenkostěnné trubky (akcelerometry)



rezonance naprázdno

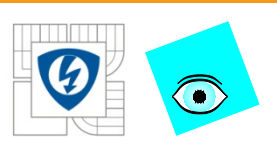
$$\Delta_1 \equiv \begin{vmatrix} J_1\left(\frac{a}{b}x\right) & Y_1\left(\frac{a}{b}x\right) \\ J_1(x) & Y_1(x) \end{vmatrix} = 0$$

rezonance nakrátko

$$\Delta_1 = k_{15}^2 \Delta_2$$

$$\lambda^2 = \rho\omega^2 / c_{44}^D \quad x \equiv \lambda b \quad \Delta_2 \equiv \frac{1}{x \ln(a/b)} \begin{vmatrix} \left[J_0\left(\frac{a}{b}x\right) - J_0(x) \right] & \left[J_1\left(\frac{a}{b}x\right) - \frac{b}{a} J_1(x) \right] \\ \left[Y_0\left(\frac{a}{b}x\right) - Y_0(x) \right] & \left[Y_1\left(\frac{a}{b}x\right) - \frac{b}{a} Y_1(x) \right] \end{vmatrix}$$

N.T.Adelman, Y.Stavsky: J.Acoust.Soc.Amer. 57, 2 (1975) 356-360



Vyšší harmonické (overtone)

Možnost jejich použití pro měření vlastností

Příklad: Tloušťkově střížné vibrace tenké desky

Rezonance

Vyšší harmonické (overtone)

$$\tan(\eta_r) = \frac{1}{k_{15}^2} \eta_r$$

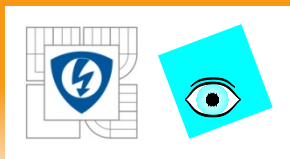
$$\eta_r = 2\pi f_r t \sqrt{\rho s_{55}^D}$$

$$\frac{\eta_{r3}}{\eta_{r1}} = \frac{f_{r3}}{f_{r1}}$$

$$\tan(\eta_{r3}) = \frac{1}{k_{15}^2} \eta_{r3}$$

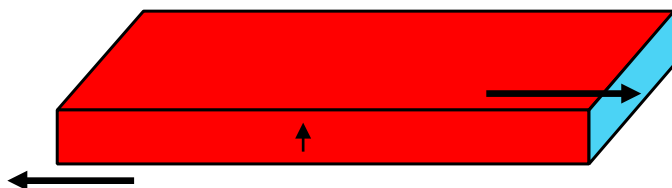
$$\tan(\eta_{r1}) = \frac{1}{k_{15}^2} \eta_{r1}$$

$$\tan\left(\frac{f_{r3}}{f_{r1}} \eta_{r1}\right) = \frac{f_{r3}}{f_{r1}} \tan(\eta_{r1})$$

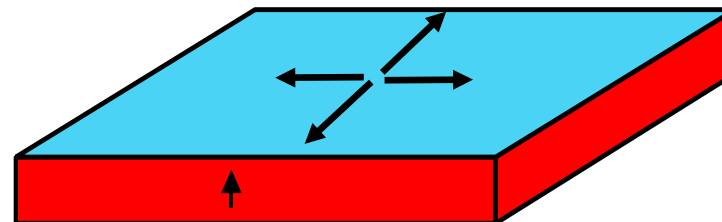


Nestandardní geometrie rezonátorů

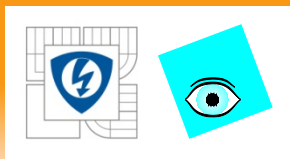
Tenká deska-tyčinka
Tloušťkově střižný
mód kmitů



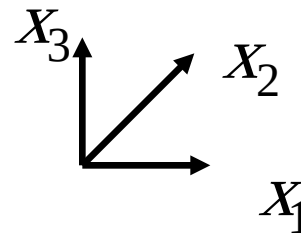
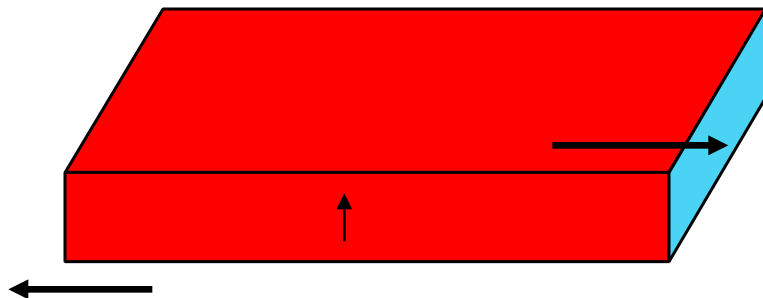
Čtvercová deska
Obrysově rozpínavý



IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Determination of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants—The Electromechanical Coupling Factor, Proceedings IRE (1958) 764–778



Tloušťkově střížné vibrace tenké desky/tyčinky



Počátek souřadnic
ve středu rezonátoru

$$S_{\mu} = 0, T_{\mu} = 0, \mu = 1, 2, 3, 4, 6$$

$$D_2 = D_3 = 0, E_2 = E_3 = 0$$

$$S_5 \neq 0, T_5 \neq 0, D_1 \neq 0, E_1 \neq 0$$

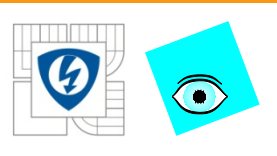
$$u_2 = u_3 = 0, u_1(x_3)$$

$$S_5 = u_{1,3}$$

$$E_1 = \frac{U}{2l} e^{j\omega t}$$

$$T_5 = c_{55}^E S_5 - e_{15} E_1$$

$$D_1 = e_{15} S_5 + \varepsilon_{11}^S E_1$$



Pohybová a Maxwellova rovnice

Pohybová rovnice

$$u_{1,33} = \frac{\rho}{c_{55}^E} \ddot{u}_1$$

$$u_1(x_3, t) = [A \cos(kx_3) + B \sin(kx_3)] e^{j\omega t}$$

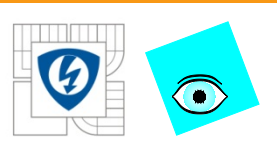
$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c_{55}^E}}$$

Maxwellova rovnice

$$D_{1,1} = 0$$

$$D_1 = C e^{j\omega t}$$

Integrační konstanty A, B, C



Okrajové podmínky

- Mechanicky volné hlavní povrchy destičky/tyčinky

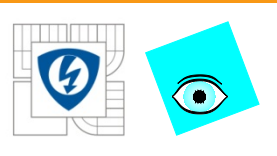
$$x_3 = \pm b \quad T_5 = 0$$

- Elektrické pole – konstantní uvnitř rezonátoru

$$x_1 = \pm l \quad E_1 = \frac{U}{2l} e^{j\omega t}$$

- Napětí na rezonátoru

$$Ue^{j\omega t} = \int_{-l}^{+l} E_1 dx_1$$



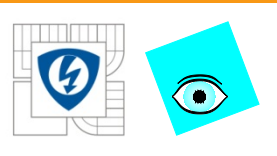
Integrační konstanty

Určíme z okrajových podmínek

$$A = 0$$

$$B = \frac{U}{2l} \frac{1}{1 - k_{15}^2} \frac{e_{15}}{c_{55}^D k \cos(kb)}$$

$$C = \frac{U}{2l} \frac{\varepsilon_{11}^s}{1 - k_{15}^2}$$



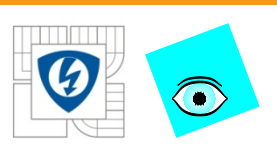
Posuvný proud a admittance rezonátoru

Posuvný proud

$$I_P = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{-b-w}^{+b+w} \int D_1 dx_2 dx_3 \right) = j\omega U e^{j\omega t} \left(\varepsilon_{11}^s \frac{2wb}{l} \right) \left[1 + \frac{k_{15}^2}{1 - k_{15}^2} \frac{\tan(kb)}{kb} \right]$$

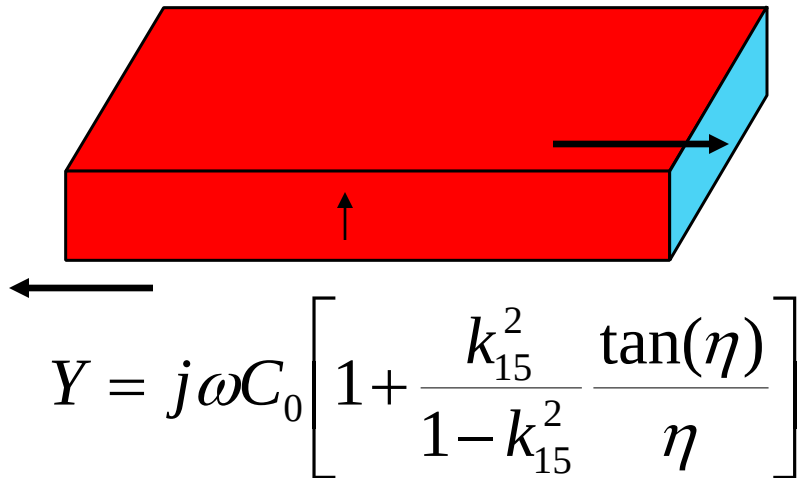
Admittance

$$Y = \frac{I_P}{U e^{j\omega t}} = j\omega C_0 \left[1 + \frac{k_{15}^2}{1 - k_{15}^2} \frac{\tan(kb)}{kb} \right]$$



Tloušťkově střížné vibrace tenké desky/tyčinky

Napěťový systém



Rezonance

$$\tan(\eta_r) \rightarrow \infty$$

Faktor elektromechanické vazby

$$T_5 \neq 0, T_\mu = 0$$

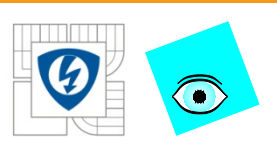
$$\eta = \omega b \sqrt{\frac{\rho}{c_{55}^E}}$$

$$C_0 = \varepsilon_{11}^s \frac{2wb}{l}$$

2l délka, 2w šířka,
2b tloušťka

piezoelektricky volné
„overtones are harmonics“

$$k_{15}^2 = \frac{d_{15}^2}{s_{55}^E \varepsilon_{11}^T}$$



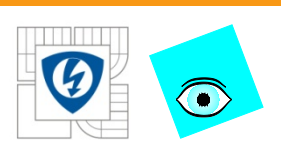
Rezonance a antirezonance

Rezonance $Y \rightarrow \infty$

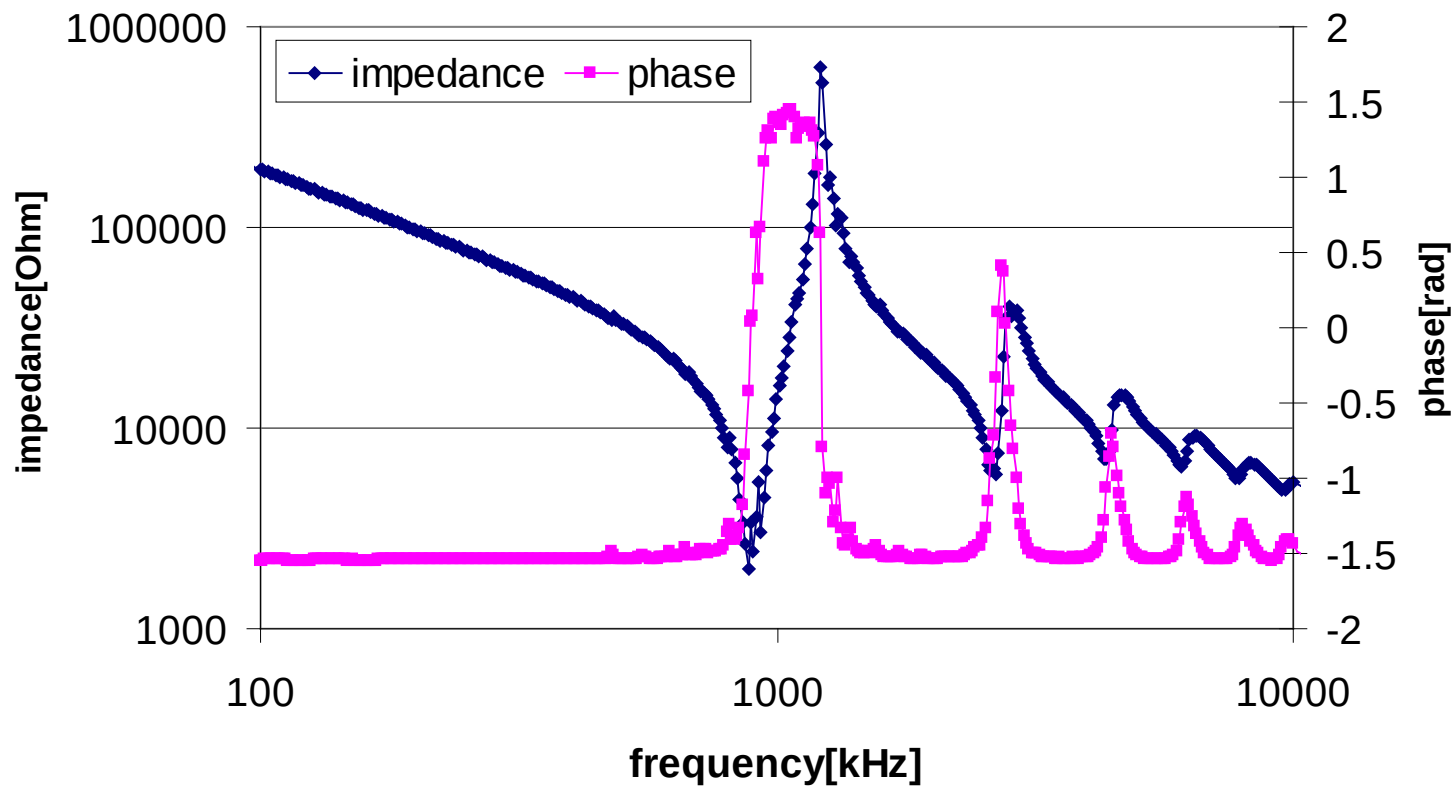
$$\eta_r = 2\pi f_r b \sqrt{\frac{\rho}{c_{55}^E}} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad f_{r1} = \frac{1}{4b} \sqrt{\frac{c_{55}^E}{\rho}}$$

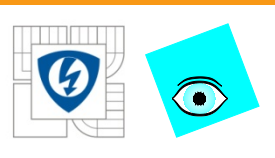
Antirezonance $Y \rightarrow 0$

$$\tan(\eta_a) = \frac{k_{15}^2 - 1}{k_{15}^2} \eta_a \quad \eta_a = 2\pi f_a b \sqrt{\frac{\rho}{c_{55}^E}}$$



Bar APC850, $l=12.2\text{mm}/w=6\text{mm}/b=1\text{mm}$,
 $C=0.0087\text{nF}$





Vibrační módy čtvercové desky

Podélný mód

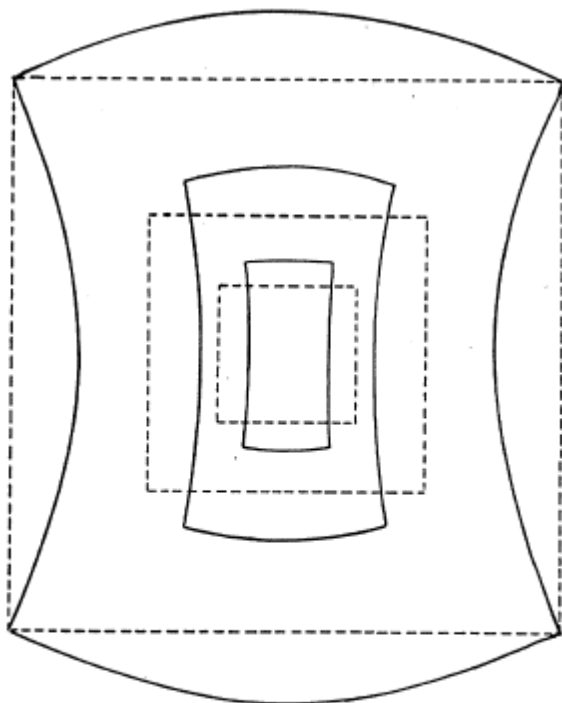


FIG. 1. Longitudinal vibration of a thin square plate.
Mode 1: $U_1 = C \cos(\pi/a)x \sin(\pi/a)y$, $V_1 = C \sin(\pi/a)x \cos(\pi/a)y$. Dotted lines—crystal at rest. Full lines—crystal vibrating.

H.Ekstein: Free vibrations of anisotropic bodies,
Phys.Rev. 66, 5 (1944) 108-118

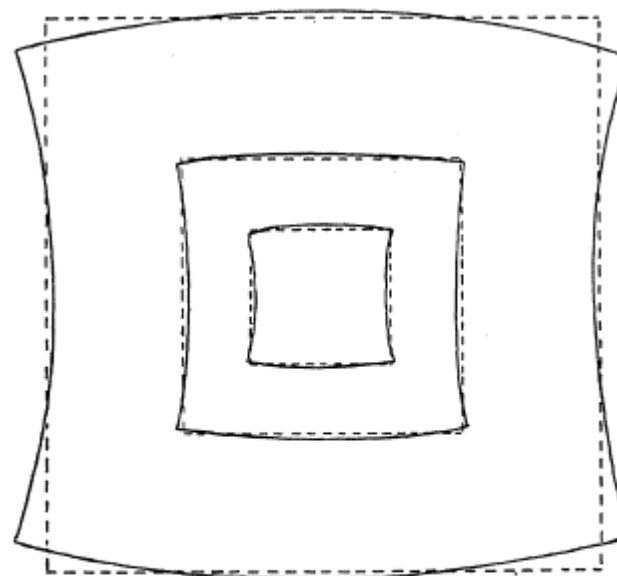
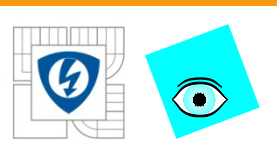


FIG. 2. Longitudinal vibration of a thin square plate.
Mode 2: $U_2 = C[\sin(\pi/a)y - (\pi/4)] \cos(\pi/a)x$,
 $V_2 = C[-\sin(\pi/a)x + (\pi/4)] \cos(\pi/a)y$.
Dotted lines—crystal at rest. Full lines—crystal vibrating.



Vibrační módy čtvercové desky

Obrysový

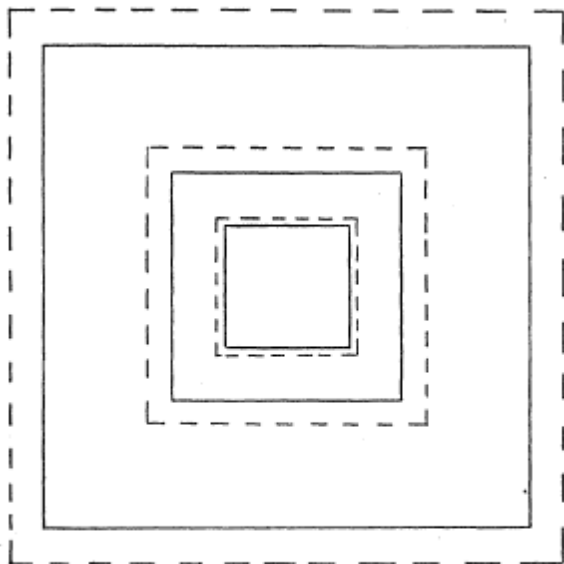


FIG. 3. Longitudinal vibration of a thin square plate.
Mode 3: $U_3 = C \cos kx$, $V_3 = C \cos ky$. Dotted lines—
crystal at rest. Full lines—crystal vibrating.

střížný

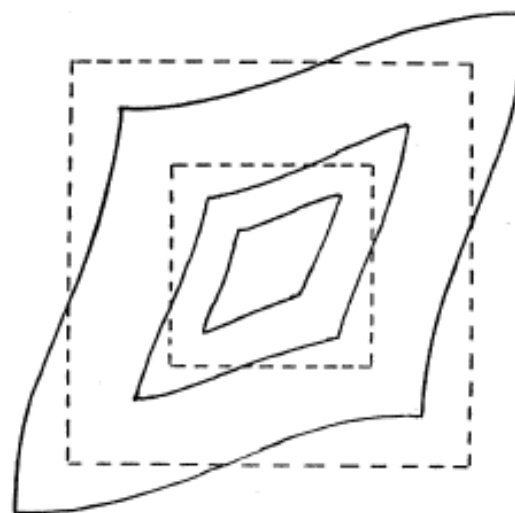
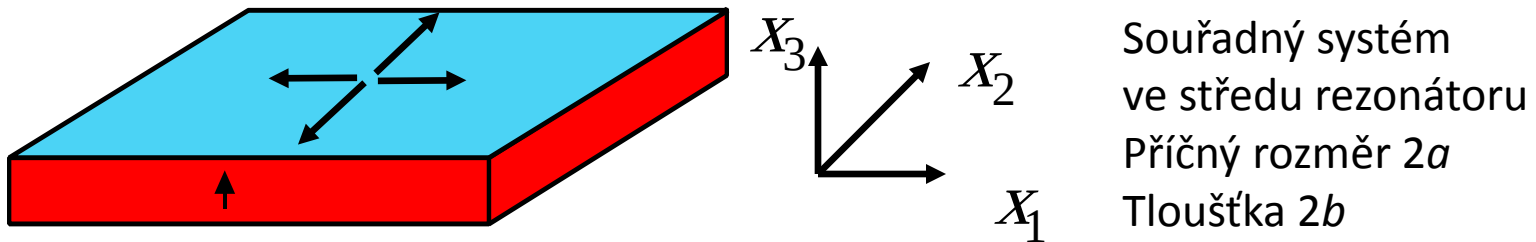


FIG. 5. Shear vibration of a thin square plate (calculated).
 $U = \cos (\pi/a)y$, $V = \cos (\pi/a)x$. Dotted line—crystal at
rest. Full line—crystal vibrating.

Obrysově rozpínavé vibrace čtvercové desky

Dvourozměrný systém, plošná rezonance v obou směrech při stejné frekvenci



$$T_3 = T_4 = T_5 = 0$$

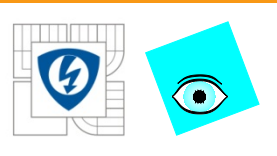
$$D_1 = D_2 = 0, E_1 = E_2 = 0$$

$$D_3 \neq 0, E_3 \neq 0$$

$$u_1(x_1), u_2(x_2), u_3(x_3)$$

$$E_3 = \frac{U}{2b} e^{j\omega t}$$

$$E_3 = -\varphi_{,3}$$



Stavové rovnice

$T_3=0$ uvnitř rezonátoru

$$T_1 = c_{11}^E u_{1,1} + c_{12}^E u_{2,2} + c_{13}^E u_{3,3} + e_{31} \varphi_{,3}$$

$$T_2 = c_{12}^E u_{1,1} + c_{11}^E u_{2,2} + c_{13}^E u_{3,3} + e_{31} \varphi_{,3}$$

$$T_3 = c_{13}^E u_{1,1} + c_{13}^E u_{2,2} + c_{33}^E u_{3,3} + e_{33} \varphi_{,3} = 0$$

$$D_3 = e_{31} u_{1,1} + e_{31} u_{2,2} + e_{33} u_{3,3} - \varepsilon_{33}^S \varphi_{,3}$$

$$T_1 = c_{11}^P u_{1,1} + c_{12}^P u_{2,2} + e_{31}^P \varphi_{,3}$$

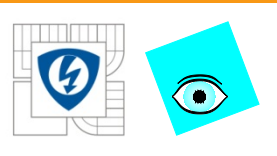
$$T_2 = c_{12}^P u_{1,1} + c_{11}^P u_{2,2} + e_{31}^P \varphi_{,3}$$

$$T_3 = 0$$

$$D_3 = e_{31}^P u_{1,1} + e_{31}^P u_{2,2} - \varepsilon_{33}^P \varphi_{,3}$$

$$c_{11}^P = c_{11}^E - \frac{(c_{13}^E)^2}{c_{33}^E}, \quad c_{12}^P = c_{12}^E - \frac{(c_{13}^E)^2}{c_{33}^E}, \quad \sigma^P = \frac{c_{12}^P}{c_{11}^P} = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}$$

$$e_{31}^P = e_{31} - e_{33} \frac{c_{13}^E}{c_{33}^E}, \quad \varepsilon_{33}^P = \varepsilon_{33}^S + \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E}$$



Pohybové rovnice a Maxwelllova rovnice

Pohybové rovnice

$$\rho \ddot{u}_1 = c_{11}^P u_{1,1}$$

$$\rho \ddot{u}_2 = c_{11}^P u_{2,2}$$

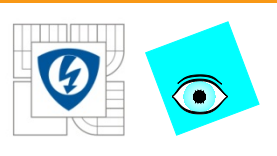
Maxwelllova rovnice

$$D_{3,3} = 0$$

$$u_1(x_1, t) = A \sin(kx_1) e^{j\omega t}$$

$$u_2(x_2, t) = B \sin(kx_2) e^{j\omega t}$$

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}^P}}$$



Okrajové podmínky

- Mechanicky volné okraje desky

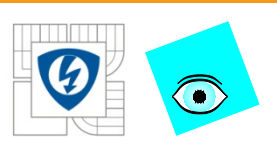
$$x_1 = \pm a, x_2 = \pm a \quad T_1 = 0, T_2 = 0$$

- Elektrické pole – konstantní uvnitř rezonátoru

$$x_3 = \pm b \quad E_3 = \frac{U}{2b} e^{j\omega t}$$

Integrační konstanty

$$A = B = -\frac{U}{2b} \frac{e_{31}^P}{c_{11}^P + c_{12}^P} \frac{1}{k \cos(ka)}$$



Posuvný proud a admittance rezonátoru

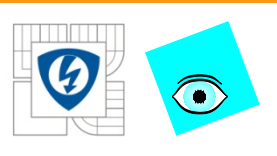
Posuvný proud

$$I_P = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{-a-a}^{+a+a} \int D_3 dx_1 dx_2 \right) = -j\omega U e^{j\omega t} \left(\varepsilon_{33}^P \frac{2a^2}{b} \right) \left[1 + \frac{2(e_{31}^P)^2}{\varepsilon_{33}^P (c_{11}^P + c_{12}^P)} \frac{\tan(ka)}{ka} \right]$$

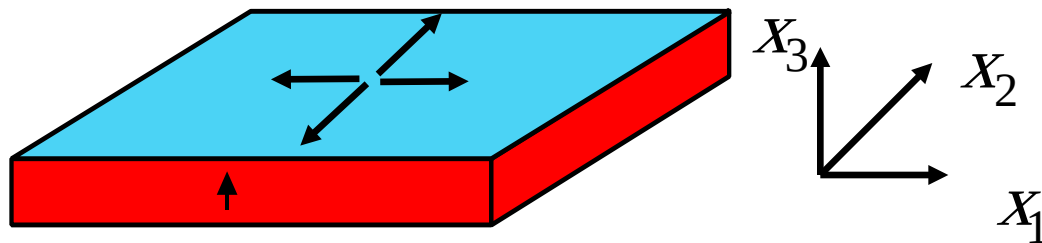
Admittance

$$Y = \frac{I_P}{U e^{j\omega t}} = -j\omega C_0 \left[1 + \frac{2(e_{31}^P)^2}{\varepsilon_{33}^P (c_{11}^P + c_{12}^P)} \frac{\tan(ka)}{ka} \right]$$

$$C_0 = \varepsilon_{33}^P \frac{2a^2}{b}$$



Obrysově rozpínavé vibrace tenké čtvercové desky



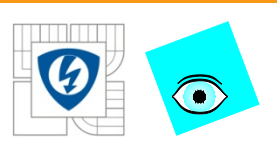
$$k = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}^P}}$$

$$c_{11}^P = \frac{1}{s_{11}^E} \frac{1}{1 - \sigma^2}$$

Admittance

$$Y = \frac{I_P}{U e^{j\omega t}} = j\omega C_0 \left[1 + \frac{k_p^2}{1 - k_p^2} \frac{\tan(ka)}{ka} \right]$$

$$C_0 = \varepsilon_{33}^P \frac{2a^2}{b}, k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)}, \varepsilon_{33}^P = \varepsilon_{33}^T (1 - k_p^2)$$



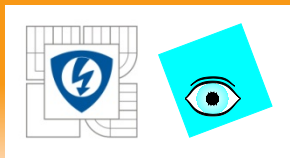
Rezonance a antirezonance

Resonance $Y \rightarrow \infty$

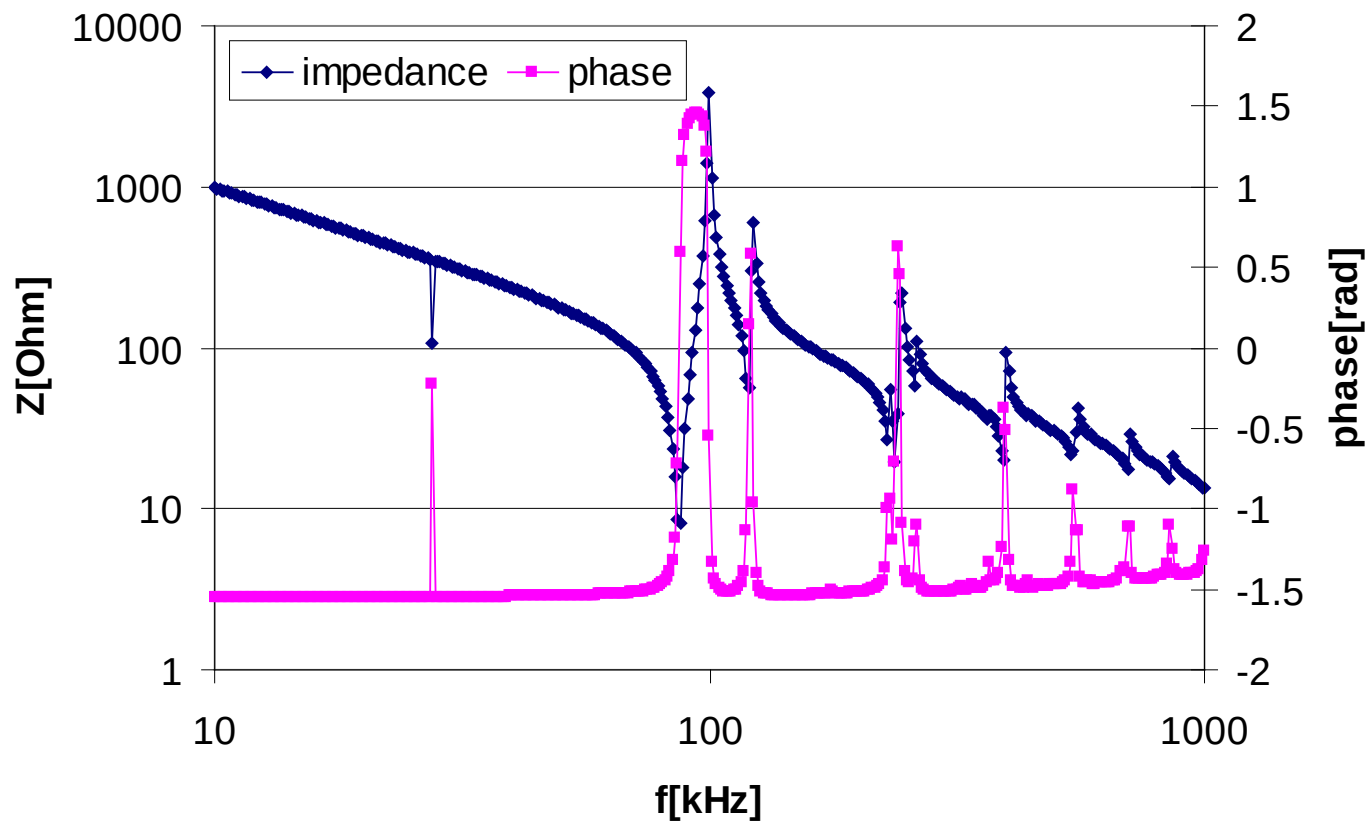
$$\eta_r = 2\pi f_r a \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}^P}} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad f_{r1} = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{c_{11}^P}{\rho}}$$

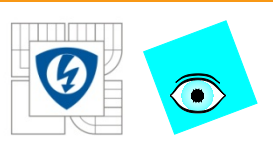
Antiresonance $Y \rightarrow 0$

$$\tan(\eta_a) = \frac{k_p^2 - 1}{k_p^2} \eta_a \quad \eta_a = 2\pi f_a a \sqrt{\frac{\rho}{c_{11}^P}}$$



**APC850, square plate 20x20mm/0.35mm,
C=16.420nF**





Teplotní koeficient rezonanční frekvence

Teplotní koeficient veličiny x

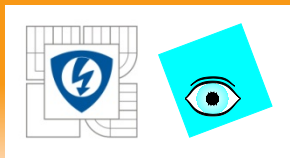
$$TK(x) = \frac{1}{x} \left(\frac{\partial x}{\partial \Theta} \right)_{\Theta_0}$$

Příklad: rezonanční frekvence tloušťkově rozpínavých vibrací tenké desky

$$TK(f_r) = TK(\eta_r) - \frac{1}{2} \alpha_{33} + \alpha_{11} - \frac{1}{2} TK(c_{33}^D)$$

$$\eta_r = \pi f_r t \sqrt{\frac{\rho}{c_{33}^D}}$$

$$\frac{TK(\eta_r)}{TK(k_t)} = \frac{2k_t^2}{k_t^2(1 - k_t^2) - \eta_r^2}$$



Doménové inženýrství pro tyčinkový rezonátor

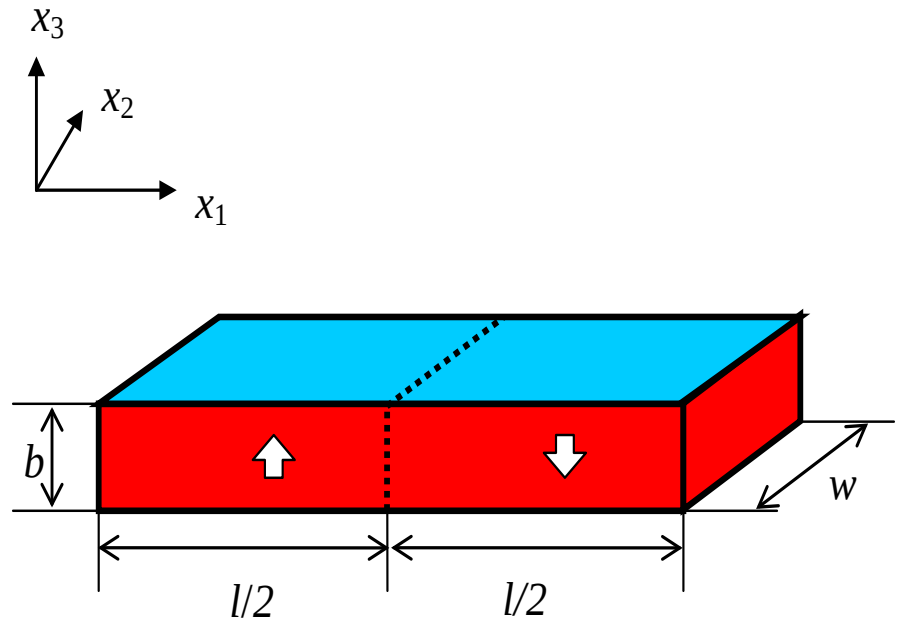
$N=1,2,3,4,5$ segmentů

$$Y_N = j\omega \left(\varepsilon_{33}^T \frac{lw}{b} \right) \left[1 - k_{31}^2 + 2Nk_{31}^2 \frac{\tan\left(\frac{1}{2N}kl\right)}{kl} \right]$$

Rezonance

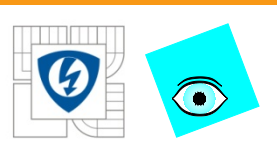
$$\frac{1}{2N}k_r l = \frac{\pi}{2}$$

$$\eta_r = k_r l = \pi f_r l \sqrt{\rho s_{11}^E}$$

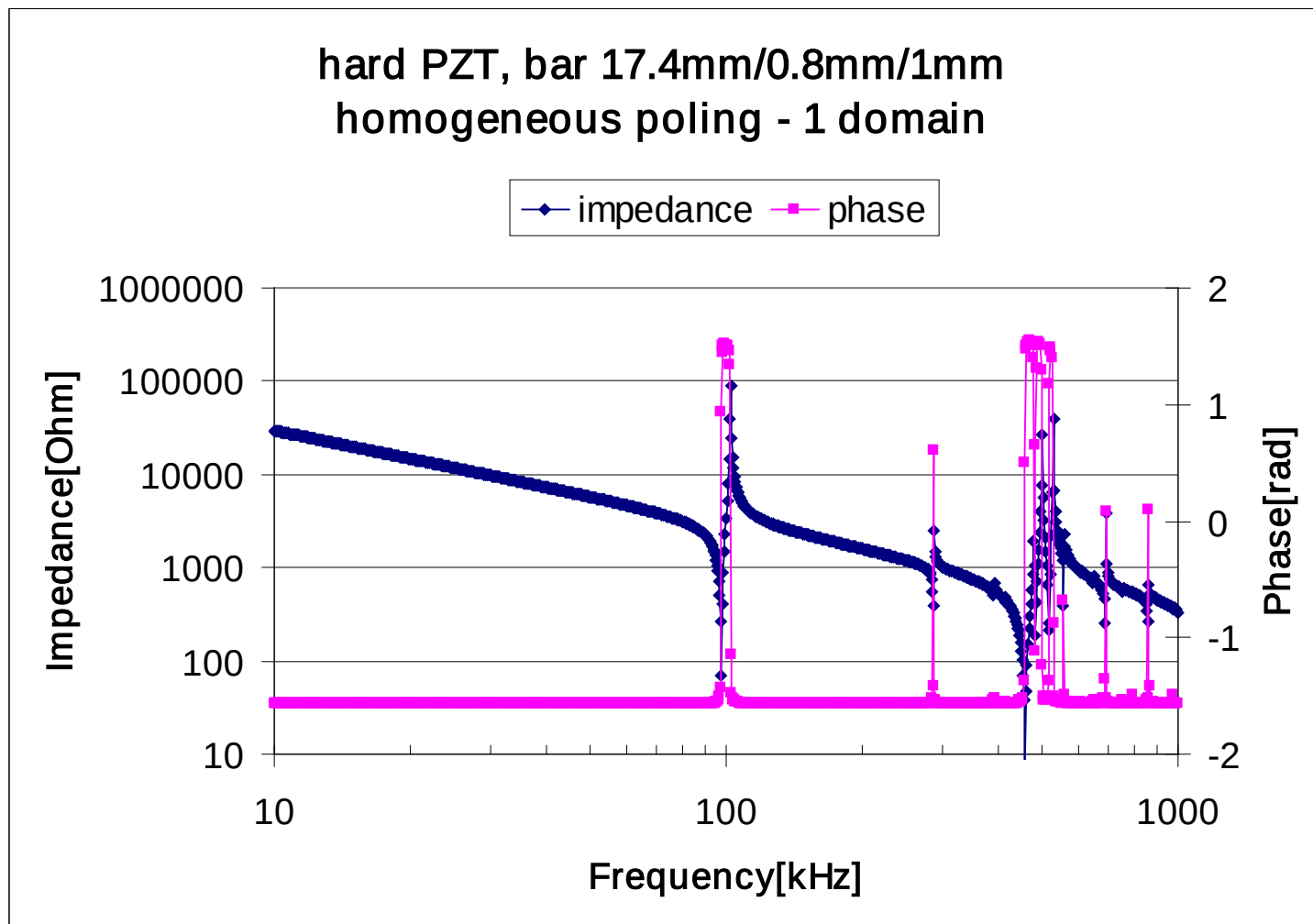


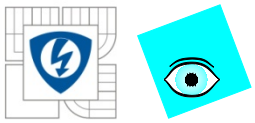
↑ ↓ polarization direction electrode

J.Erhart, M.Francíková, L.Rusin: Piezoelectric resonators with engineered domain structures, *Ferroelectrics* **376**, 1 (2008) 99-115

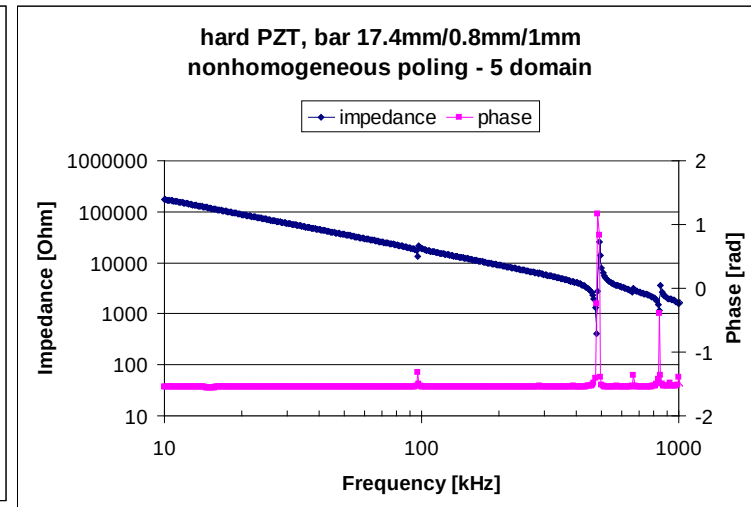
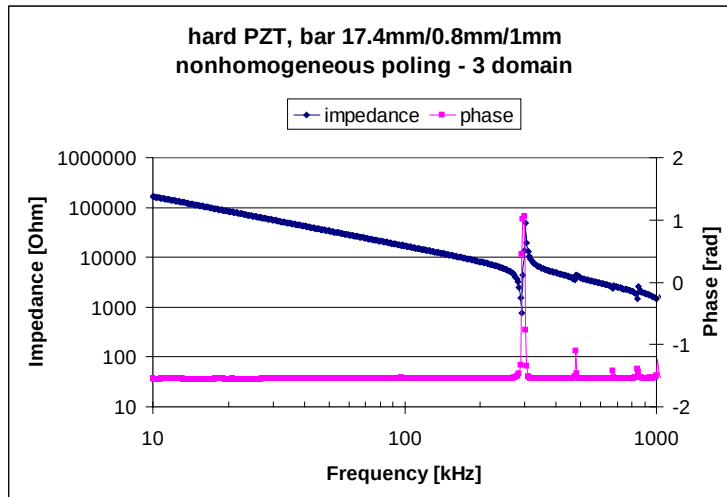
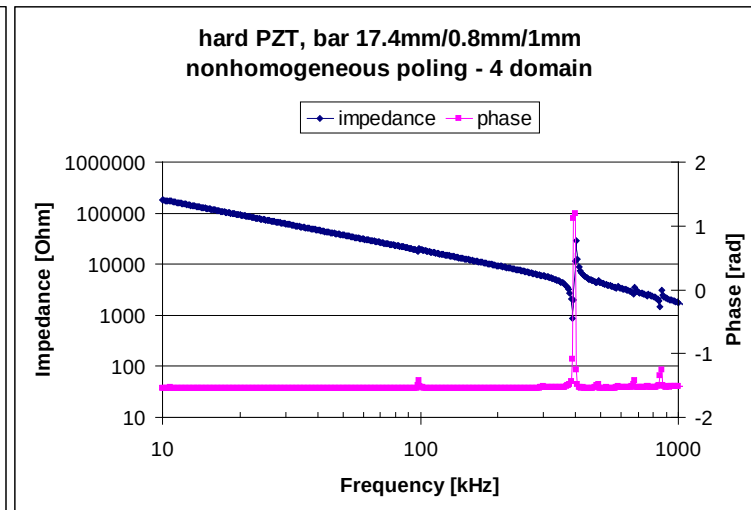
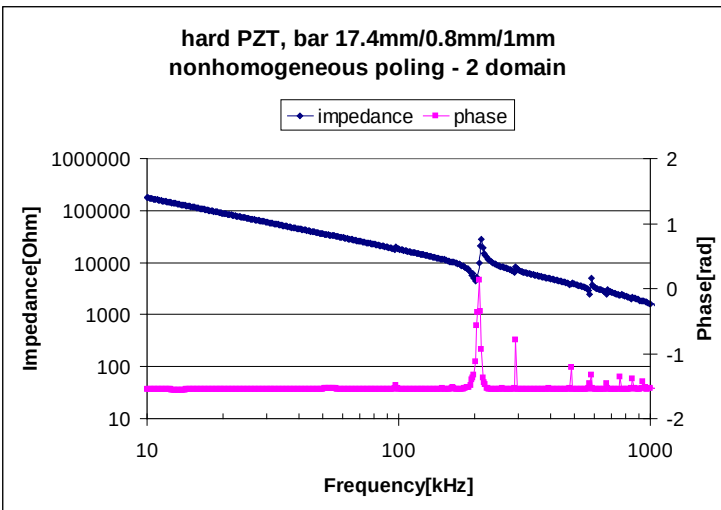


Homogenně polarizovaná tyčinka





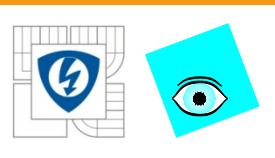
Nehomogenně polarizované tyčinky



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

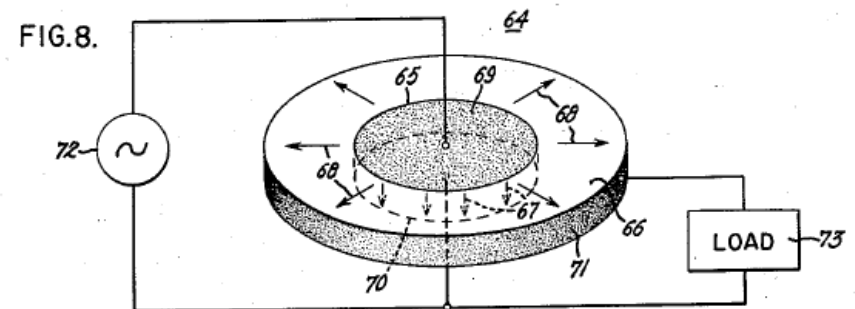
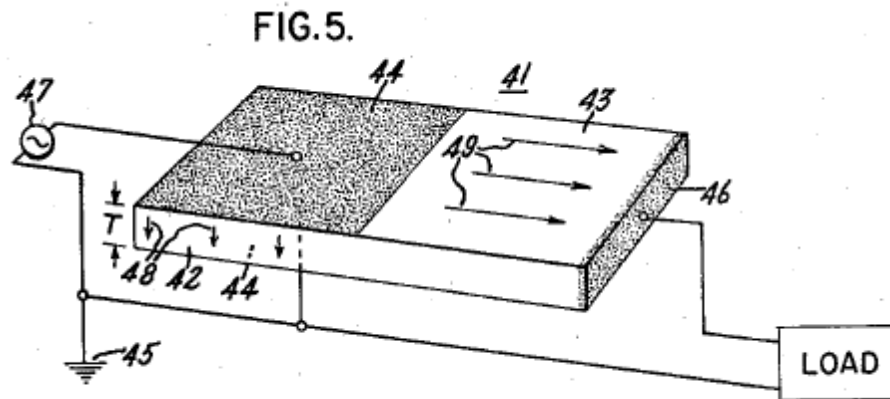


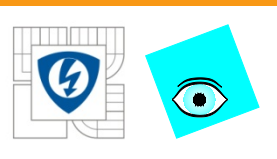


Piezoelektrický transformátor Rosenova typu

US patent No.2,830,274 (1958), C.A.Rosen et al.

Piezoelektrický transformátor Rosenova typu

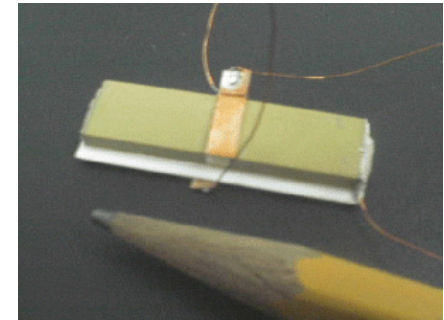




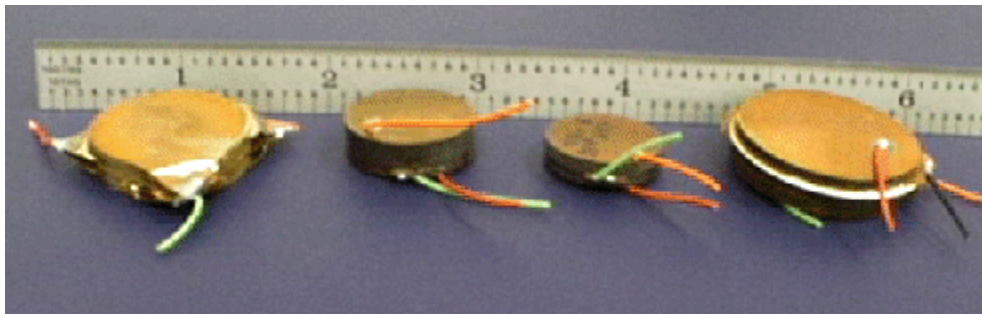
Piezelektrické transformátory – komerční produkty

Integrované s elektronikou – CCFL electronics

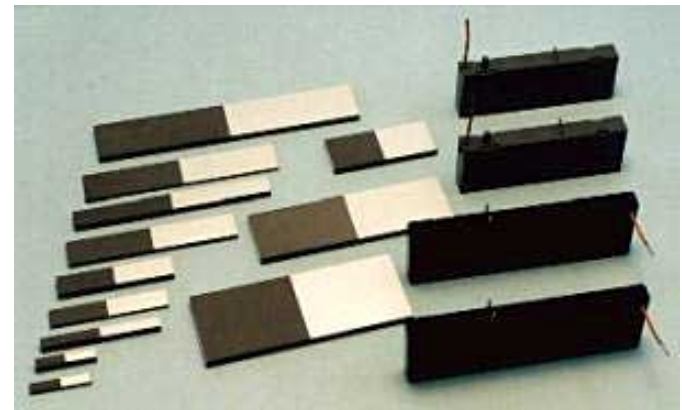
- Rosen-type (e.g. Fuji & Co., Japan)
- “Transoner” (Face Electronics, USA)
- Multilayer structures (e.g. Noliac A/S, Denmark)

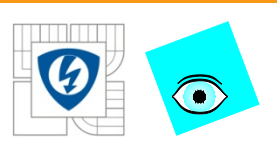


A CCFL Transoner is only 3mm Thick

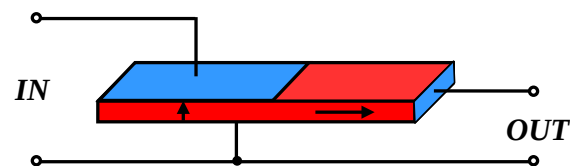
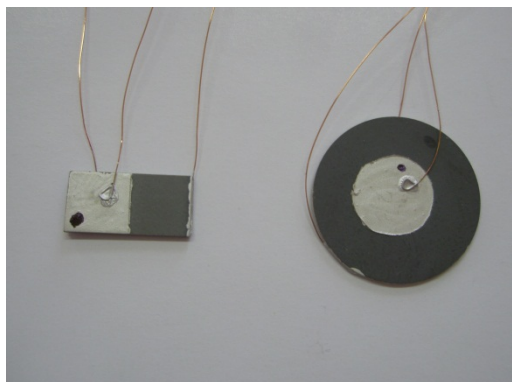


Transoners Made in the Face Labs: 40 watt, 5 watt, 15 watt, & 30 watt





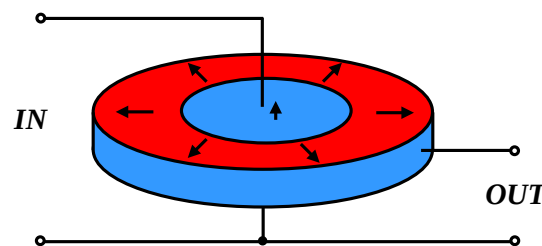
PT Rosenova typu



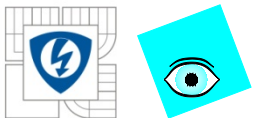
ceramics
 electrode
 polarization

Radiální polarizace - nehomogenní

$$E(r) = \frac{U}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r}$$

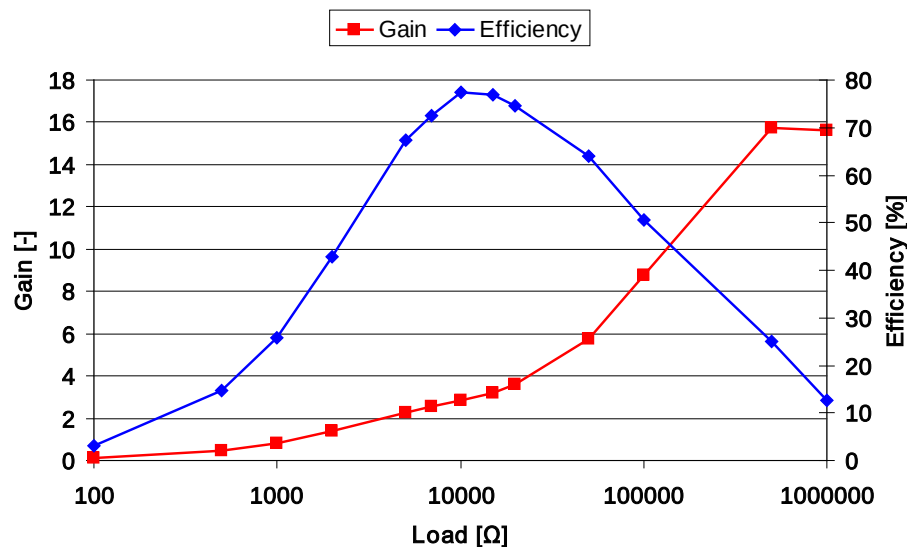


ceramics
 electrode
 polarization

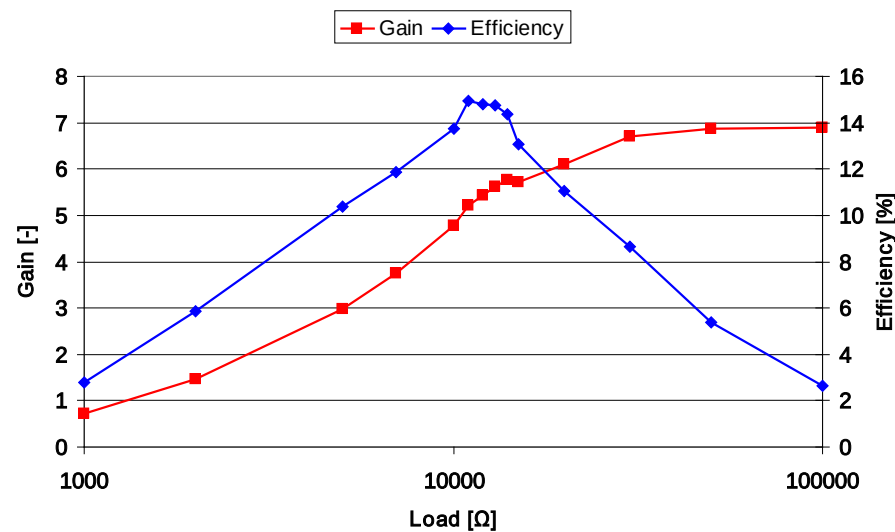


PT Rosenova typu

Rectangular Rosen PT No. 2
APC841 14mm/7mm/th.1mm

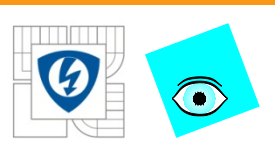


Disc Rosen PT No. 1
APC841 diam. 20mm/th.0.8mm



2.12.2011

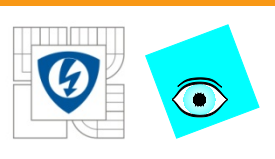
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



PT Rosenova typu

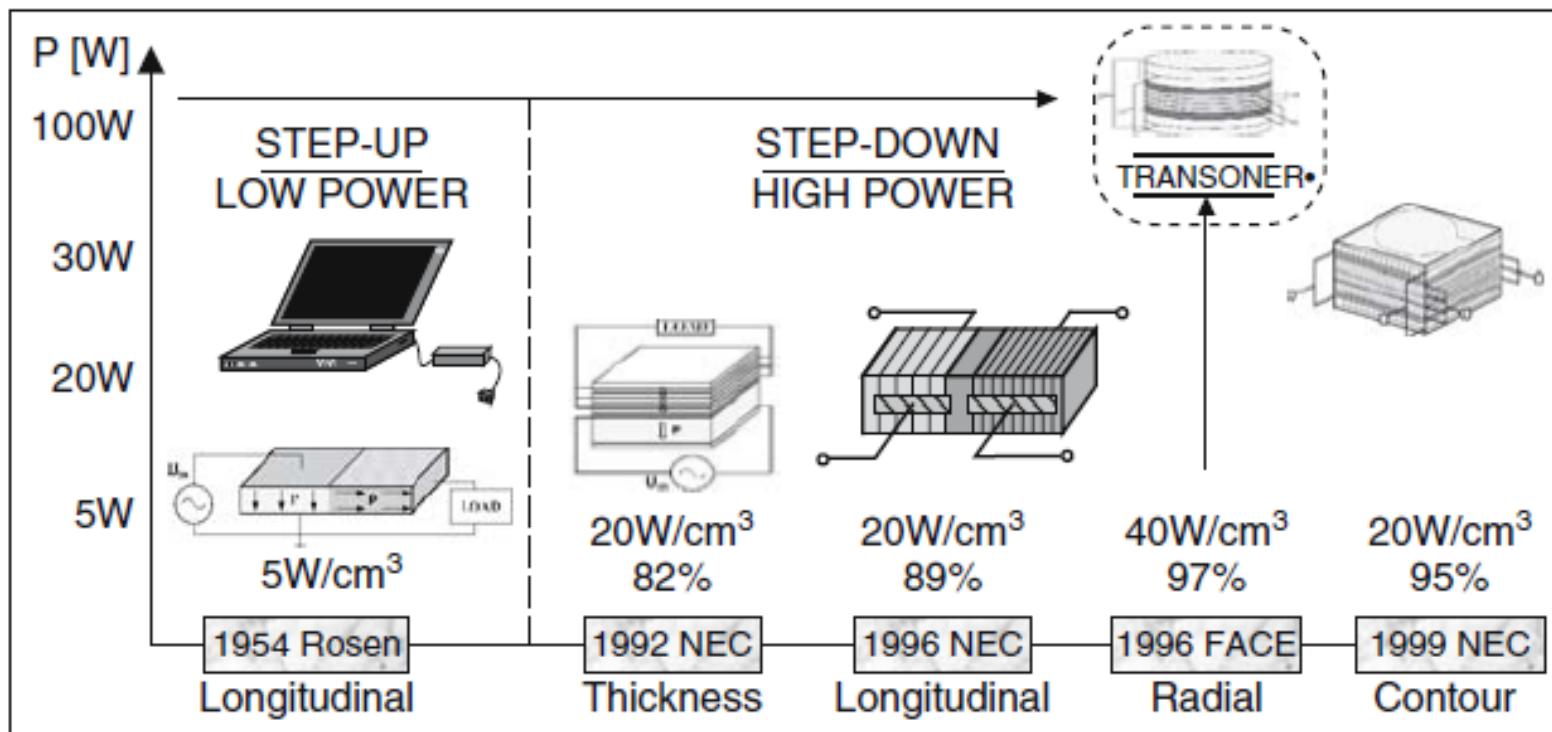
Rectangular Rosen PT APC 841, $l = 14\text{mm}$, $w = 7\text{mm}$, $b = 1\text{mm}$, $V = 98\text{mm}^3$	
No-load parameters $Z_L \rightarrow \infty$, $\eta \rightarrow 0$	
$(U_2/U_1)_\infty = 22$	$f_r = 113.85 \text{ kHz}$
Optimum load parameter $Z_L = 10\text{k}\Omega$	
$(U_2/U_1)_{OPT} = 3$	$f_r = 113.05 \text{ kHz}$
$\eta_{OPT} = 77\%$	$f_r = 113.05 \text{ kHz}$
Peak power	
$P_{IN} = 56.5\text{mW}$	$f_r = 113.10 \text{ kHz}$
$P_{OUT} = 43.6\text{mW}$	$f_r = 113.08 \text{ kHz}$
Peak power density	
$P_{IN}/V = 0.58\text{Wcm}^{-3}$	
$P_{OUT}/V = 0.44\text{Wcm}^{-3}$	
Input and Output impedance	
$Z_{IN} = 167\Omega$	$f_r = 112.9 \text{ kHz}$
$Z_{IN} = 92.2\text{k}\Omega$	$f_a = 115.4 \text{ kHz}$
$Z_{OUT} = 1.68\text{k}\Omega$	$f_r = 113.0 \text{ kHz}$
$Z_{OUT} = 14.5\text{M}\Omega$	$f_a = 123.4 \text{ kHz}$

Disc Rosen PT APC 841, $r = 10\text{mm}$, $b = 0.8\text{mm}$, $V = 251\text{mm}^3$	
No-load parameters $Z_L \rightarrow \infty$, $\eta \rightarrow 0$	
$(U_2/U_1)_\infty = 19$	$f_r = 120.25 \text{ kHz}$
Optimum load parameter $Z_L = 11\text{k}\Omega$	
$(U_2/U_1)_{OPT} = 5$	$f_r = 119.60 \text{ kHz}$
$\eta_{OPT} = 15\%$	$f_r = 119.60 \text{ kHz}$
Peak power	
$P_{IN} = 251.9\text{mW}$	$f_r = 119.63 \text{ kHz}$
$P_{OUT} = 37.6\text{mW}$	$f_r = 119.60 \text{ kHz}$
Peak power density	
$P_{IN}/V = 1.00\text{Wcm}^{-3}$	
$P_{OUT}/V = 0.15\text{Wcm}^{-3}$	
Input and Output impedance	
$Z_{IN} = 20.5\Omega$	$f_r = 120.25 \text{ kHz}$
$Z_{IN} = 342\text{k}\Omega$	$f_a = 128.94 \text{ kHz}$
$Z_{OUT} = 7.2\text{k}\Omega$	$f_r = 120.21 \text{ kHz}$
$Z_{OUT} = 54.0\text{k}\Omega$	$f_a = 120.48 \text{ kHz}$

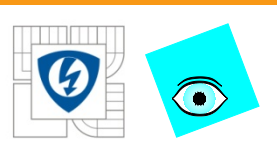


Výkonová hustota pro PT - srovnání

Hustota výkonu se značně zvětšila od první aplikace PT



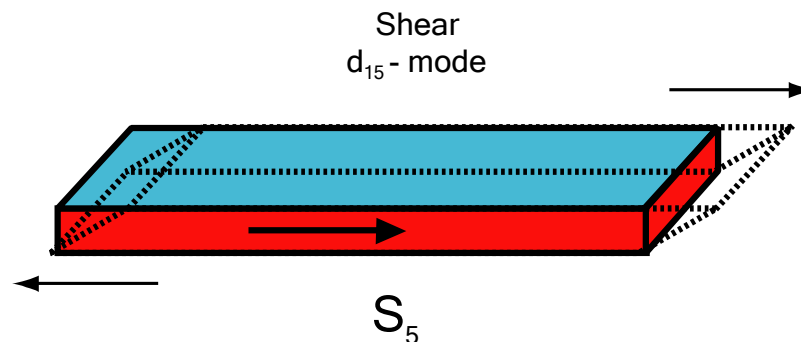
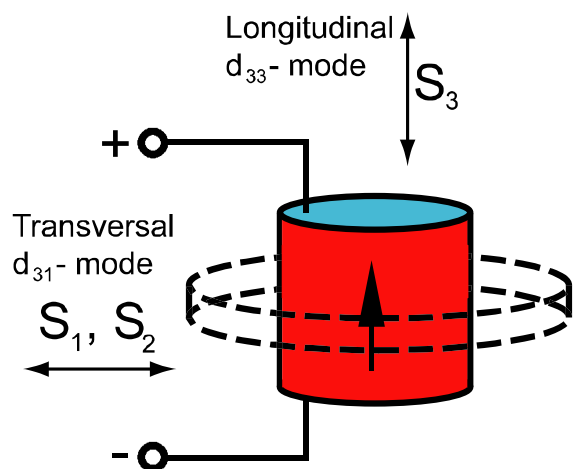
K.Uchino: Piezoelectric motors and transformer, in Piezoelectricity, Springer Verlag 2008

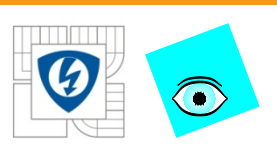


Piezelektrická aktuace

Přímý piezelektrický jev – senzory

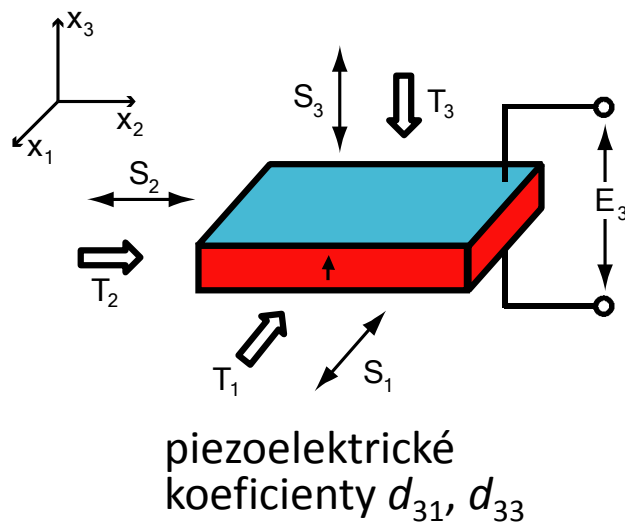
Obrácený piezelektrický jev – aktuátory, generace ultrazvuku





Piezoelektrické koeficienty

Mechanická deformace je přímo úměrná napětí



$$S_1 = d_{31} E_3$$

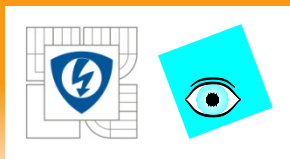
$$S_2 = d_{31} E_3$$

$$S_3 = d_{33} E_3$$

$$E_3 = U / t$$

Typické hodnoty $d_{31} \approx 100\text{-}300 \text{ pC/N}$ ($10^{-12} \text{ C/N} = 10^{-12} \text{ m/V}$), $d_{33} \approx 200\text{-}600 \text{ pC/N}$ pro PZT keramiku

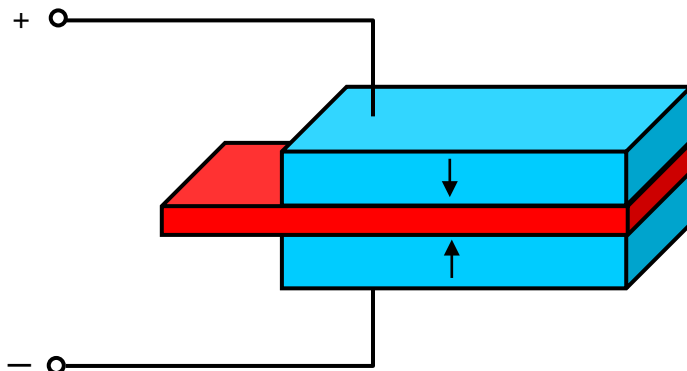
Piezokeramický bimorf



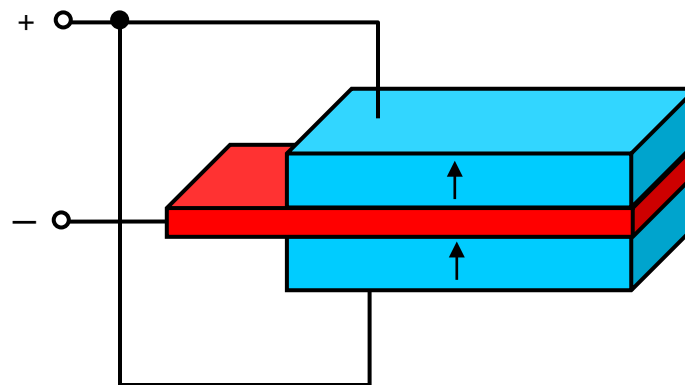
-  PZT plate
-  Metallic shim

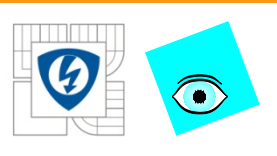
Ohybová deformace, provoz staticky, kvazistaticky nebo dynamicky pro aktuátor

Antiparalelní (sériový)



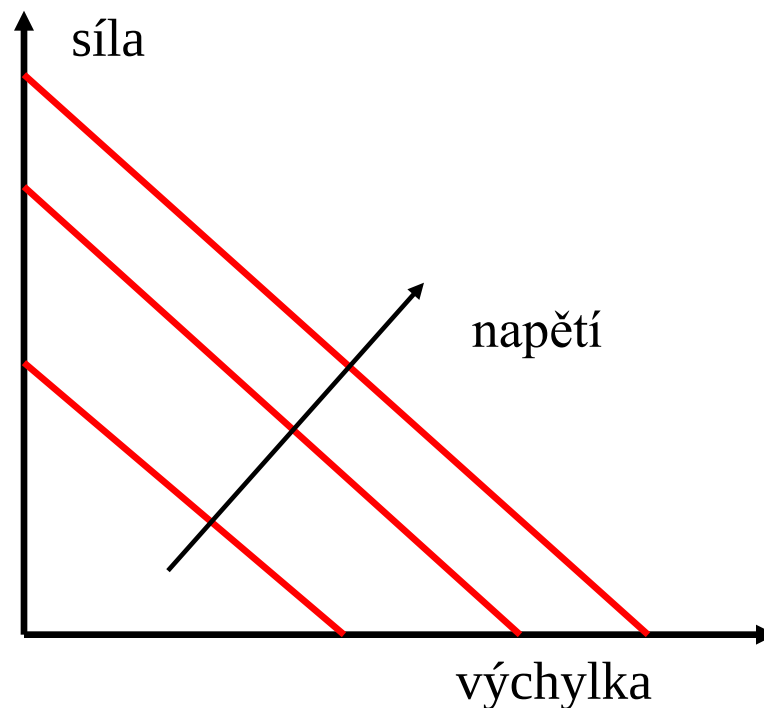
Paralelní (Zapojení jednoho nebo obou PZT elementů!)

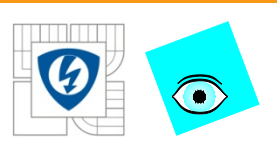




Parametry bimorfu

- (Volná) Výchylka (free stroke)
- Blokovací síla
- Rezonanční frekvence
- Výchylka při rezonanci





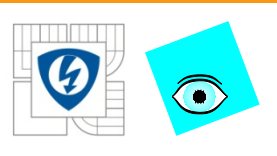
Výchylka (stroke)

(Volná) výchylka (paralelní bimorf)

$$\delta = - \frac{6s_{11}^m d_{31} (h + t_m) L^2}{2s_{11}^m (4h^3 + 6h^2 t_m + 3ht_m^2) + s_{11}^E t_m^3} V$$

bez kovové desky

$$\delta = \frac{3d_{31} L^2}{4h^2} V$$

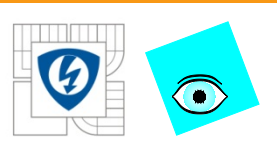


Blokovací síla (paralelní bimorf)

$$F_{bl} = -\frac{3}{2} \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{(h + t_m)w}{L} V$$

Bez kovové desky

$$F_{bl} = -\frac{3}{2} \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{hw}{L} V$$



Rezonance bimorfu

- Rezonanční frekvence (s kovovou deskou)

$$f_{ri} = \frac{\lambda_i^2 (2h + t_m)}{4\pi L^2} \sqrt{\frac{1}{3\rho_P s_{11}^E} \frac{1 + 3(1 + 2B)^2 + 4AB^3}{4(1 + B)^2 (1 + BC)}}$$

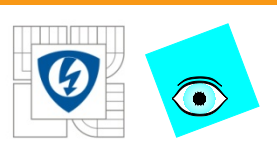
$$A = \frac{s_{11}^E}{s_{11}^m}, \quad B = \frac{t_m}{2h}, \quad C = \frac{\rho_m}{\rho_P}$$

$$\lambda_1 = 1.8751, \lambda_2 = 4.6941, \lambda_3 = 7.8751$$

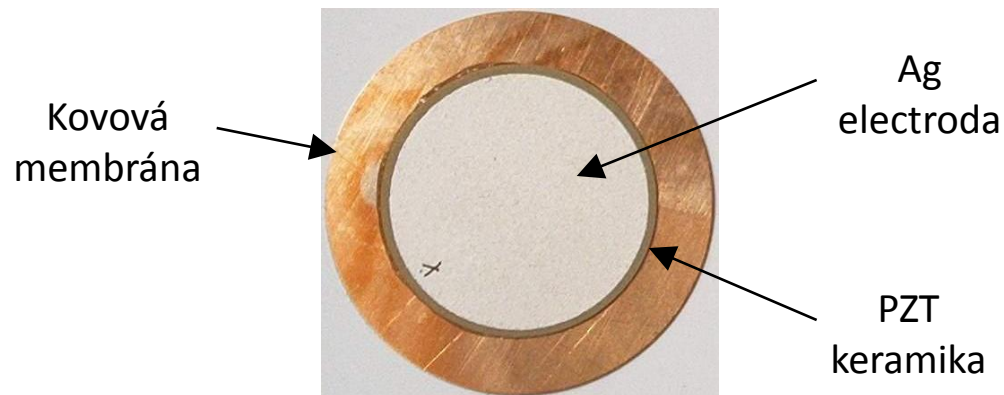
- Výchylka při rezonanci (bez kovové desky)

$$\delta = \frac{3d_{31} V \sin(\Omega L) \sinh(\Omega L)}{4h^2 \Omega^2 (1 + \cos(\Omega L) \cosh(\Omega L))}$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{2\pi f}{a}}, \quad a^2 = \frac{EI}{\rho A}, \quad I = \frac{1}{12} wh^3$$

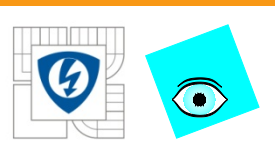


Piezokeramické unimorfy



Podobně jako bimorfy
ale v kruhovém uspořádání

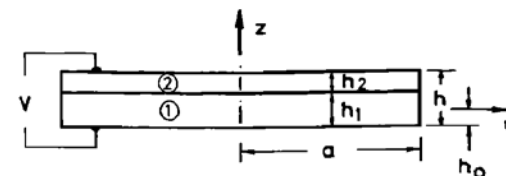
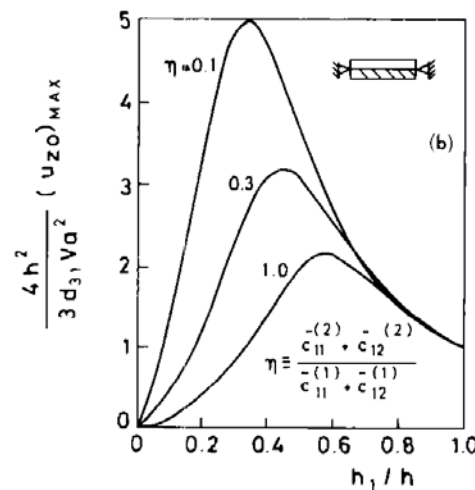
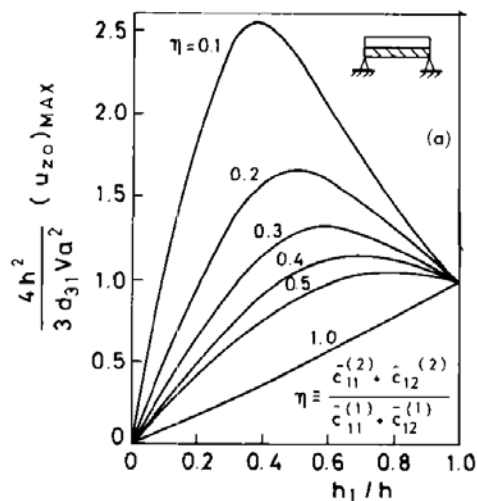
Komplikované matematické
řešení

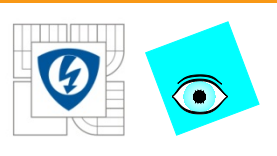


Parametry unimorfu

(statická) výchylka

- homogenní unimorf $\delta(r) = \frac{3Vd_{31}}{4h^2}(r^2 - a^2)$
- heterogenní unimorf $\delta(r) = \frac{3Vd_{31}}{8h^2} \left[2 - \left(\frac{2h_1}{h} \right)^2 \right] (r^2 - a^2)$

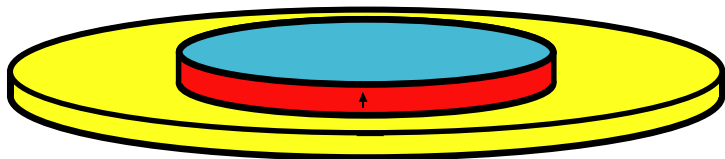




Piezoelektrické keramické aktuátory

Ohybové elementy (bimorf, unimorf, moonie, cymbal, THUNDER, Helimorph, RAINBOW)

Výchyvky až 1-3mm a síly až 0.1N!



Unimorf (membrána)

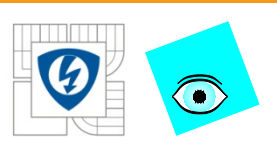


 PZT

 Kovová deska

 Elektroda

Bimorf

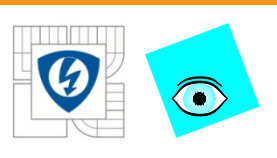


Provozní omezení pro PZT keramiku

Depolarizace – nežádoucí změny v uspořádání dipólových momentů, možná ztráta piezoelektrických vlastností

Depolarizační vlivy:

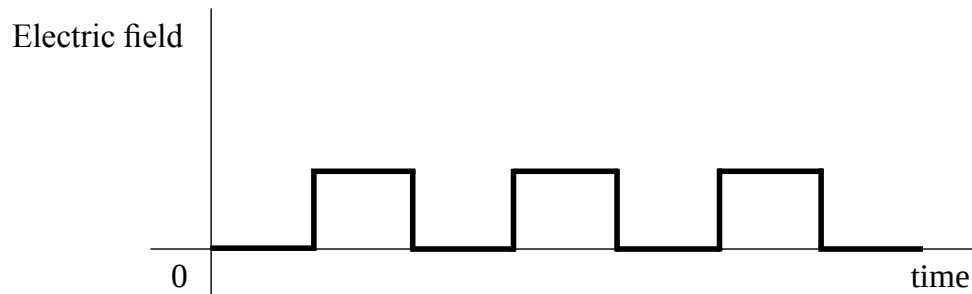
- Teplota ($< 1/2 T_C$)
- Mechanický tlak (zvláště pak tah!)
- Elektrické pole opačné polarity než polarizační pole



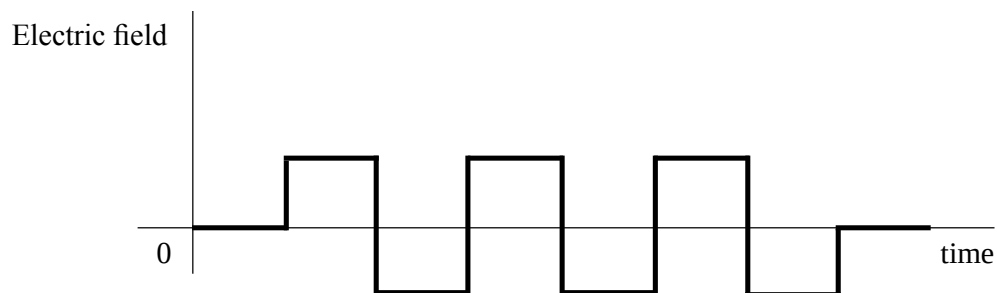
Provozní podmínky pro keramiku

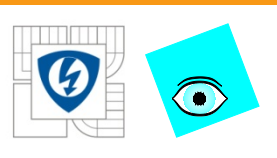
Elektrické pole

- Unipolární



- Bipolární

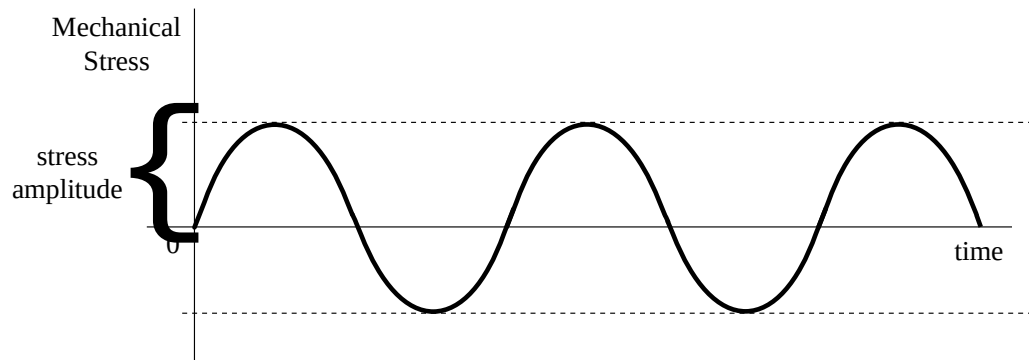




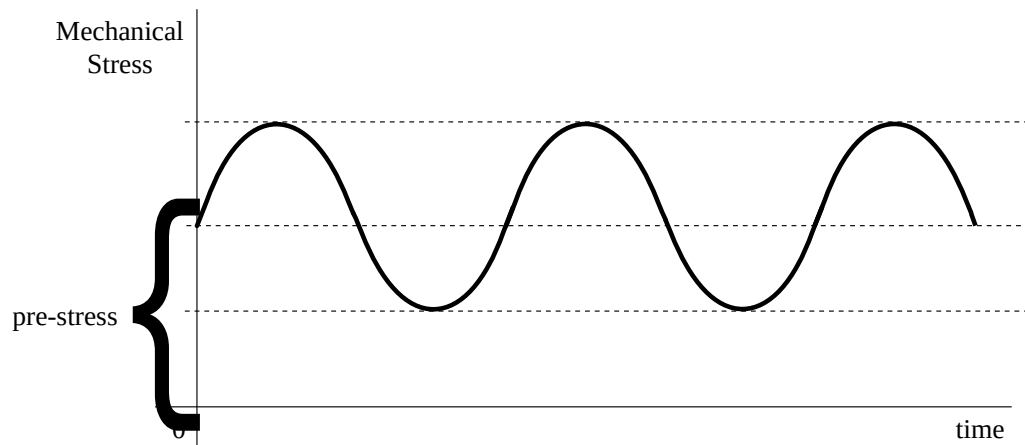
Provozní podmínky pro keramiku

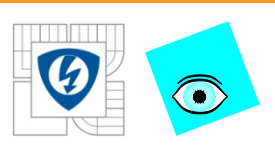
Mechanický tlak – předpětí

- Bez předpětí



- S předpětím
(pouze tlaky)



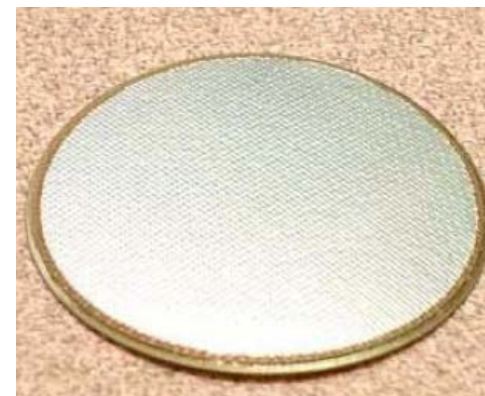
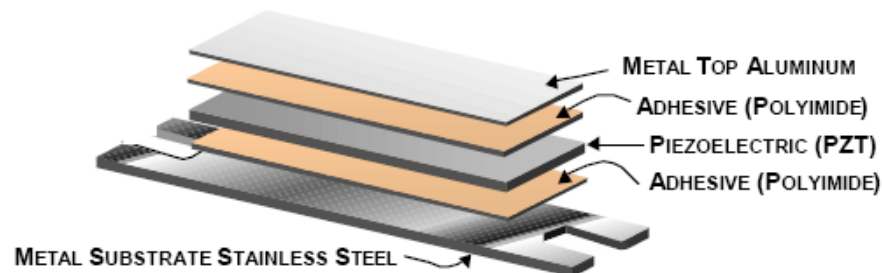


THUNDER[®]

THin layer UNimorph DrivER and sensor

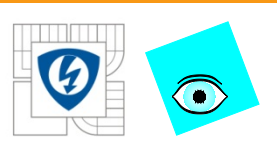
Speciální lepení při vyšší teplotě – mechanické předpětí

Posunutí až 8mm a síla 100N!



2.12.2011

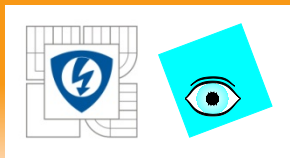
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Dvojitá spirální keramická struktura



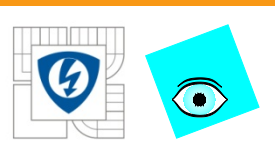
Velké posunutí 5mm a síla 1N!



Reduced **And Internally Biased Oxide Wafer** Monolitická keramická struktura

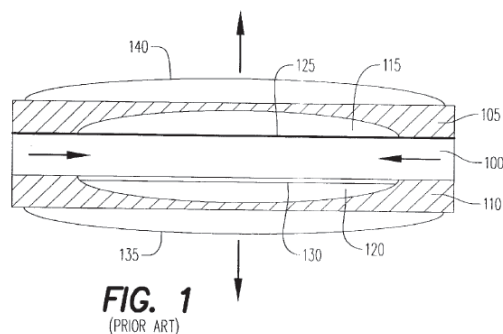
Je vytvořen vnitřní gradient chemického složení ve směru tloušťky destičky – gradient piezoelektrického koeficientu pak vede na velmi vysokou přípustnou deformaci až 500%!



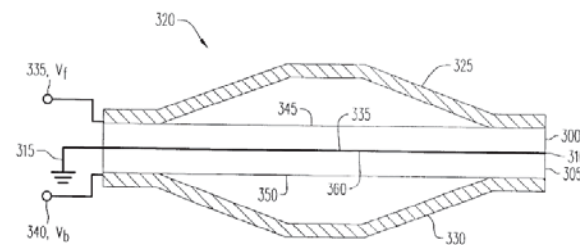


Moonie a cymbal

Moonie

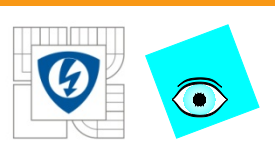


Cymbal

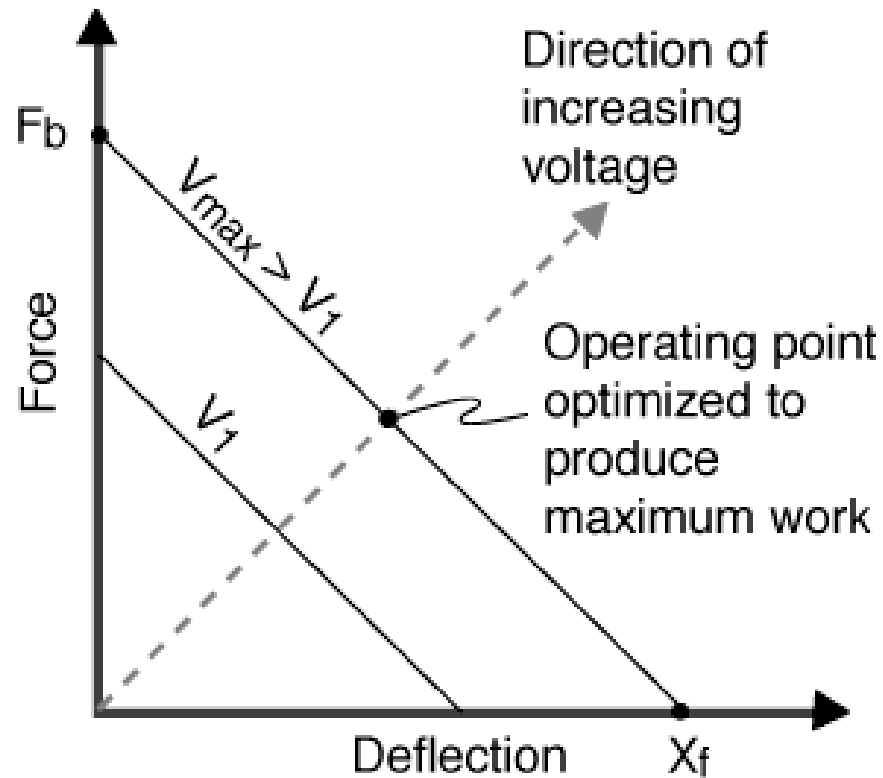


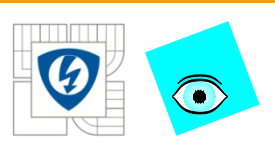
Kompozitní struktury – kovové čepičky a PZT disk slepeny pevně dohromady; radiální pohyb keramiky se transformuje na osový pohyb středů čepiček

Výchylka až $50\mu\text{m}$, malá síla; velmi vysoká citlivost



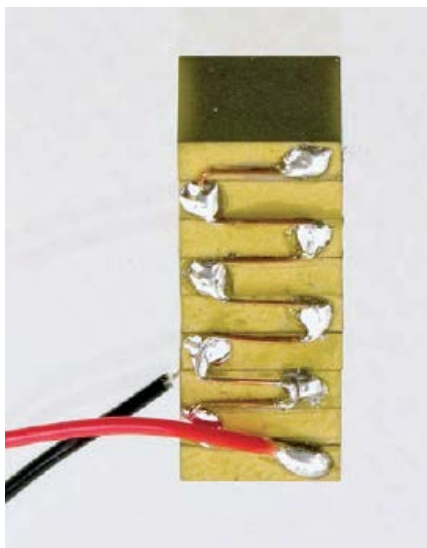
Provozní parametry ohybových aktuátorů



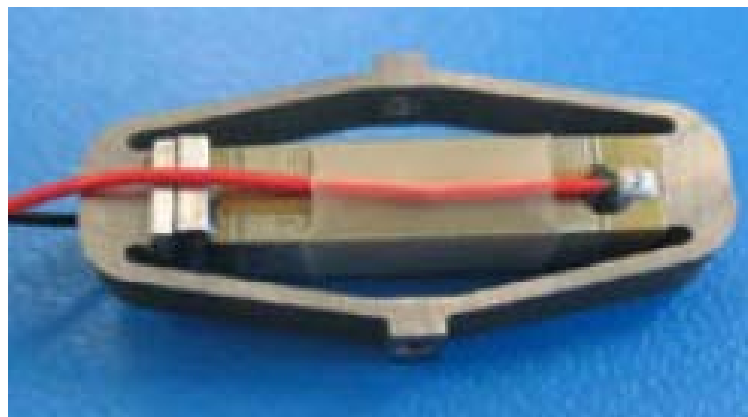


Mnohovrstvé aktuátory

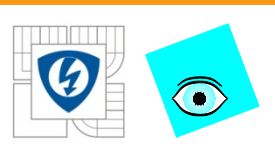
Mnoho tenkých vrstev PZT keramiky
Mnohovrstvé segmenty se skládají na sebe



s mechanickými zesilujícími rameny
(Cedrat Technologies, Francie)

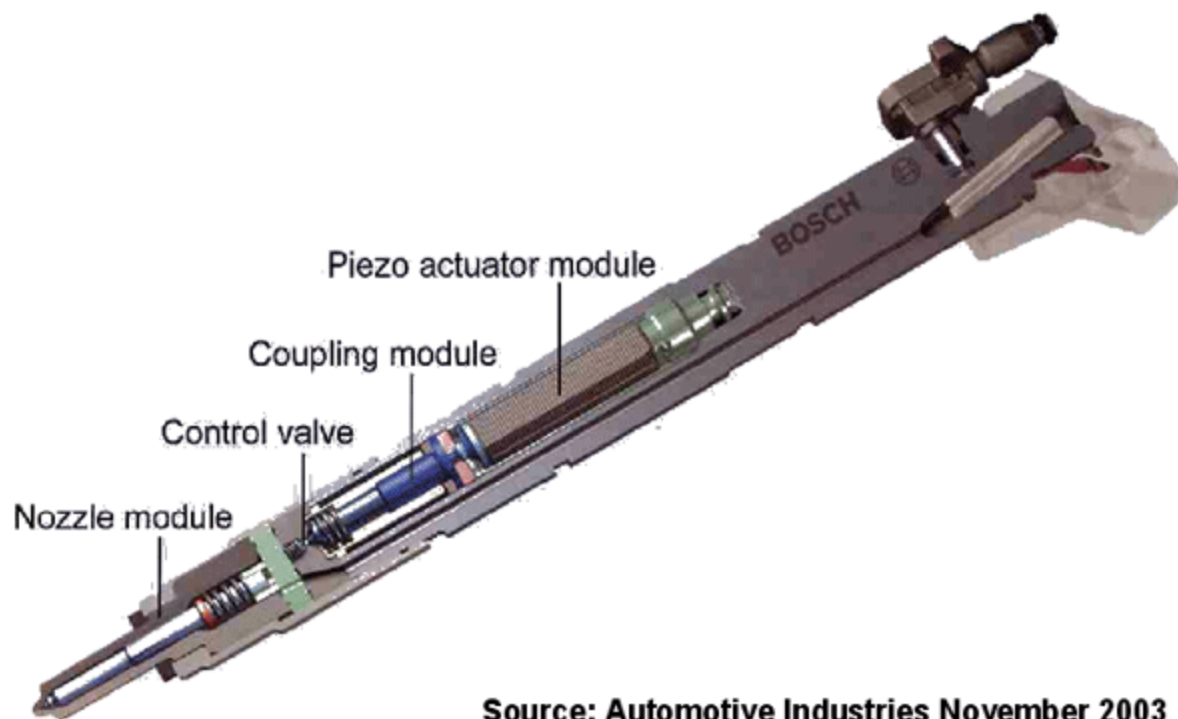


Vysoká blokovácí síla (kN), velmi nízké posuvy ($\approx 1-10\mu\text{m}$) bez mechanického zesílení



Piezo-Electric Diesel Injector

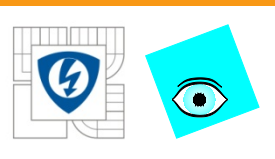
Piezo-Electric Diesel Injector



2.12.2011

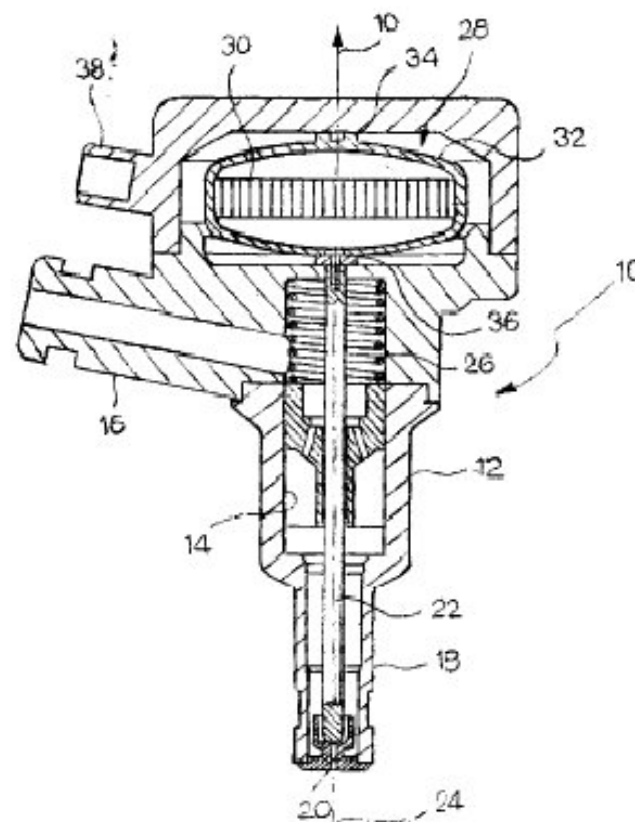
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Vstřikovač paliva do motoru

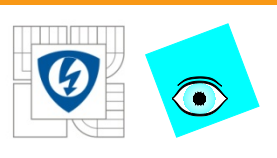
Cedrat Technologies, Francie



Patent EP1070844A1

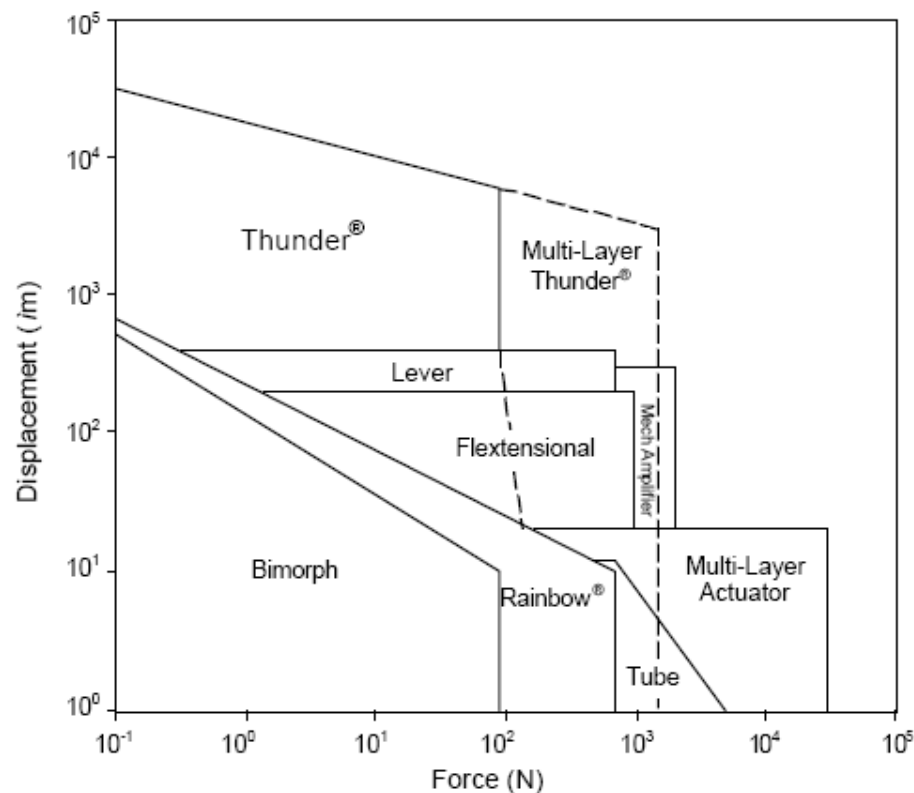
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Srovnání parametrů aktuátorů

Nízká výchylka – vysoká blokovácí síla

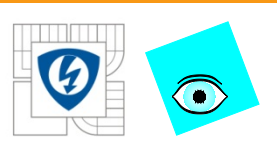


Craig D. Near, *Piezoelectric Actuator Technology*, Presented at SPIE Smart Structures and Materials Conference, February 27, 1996

2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

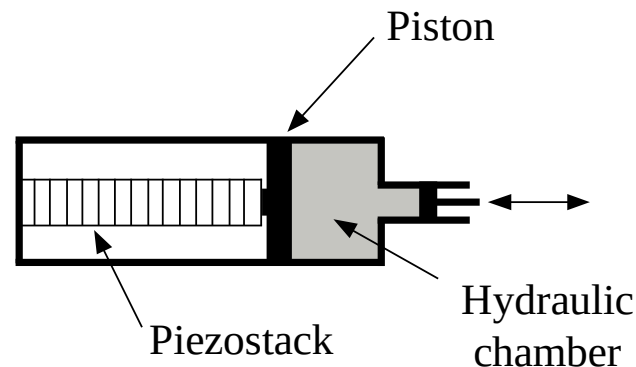
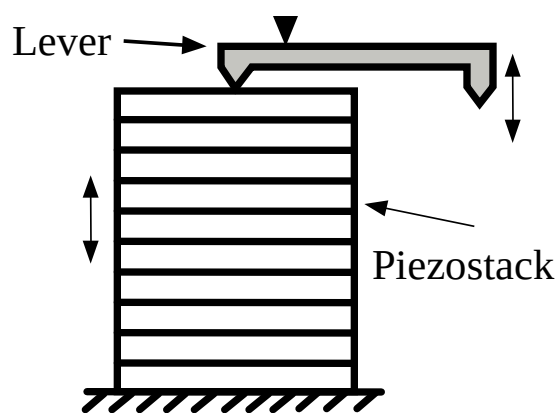


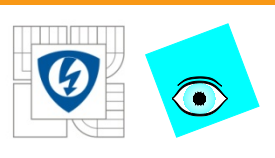


Zesílení výchylky piezoelektrických aktuátorů

Výchylka většinou není pro přímé použití dost velká

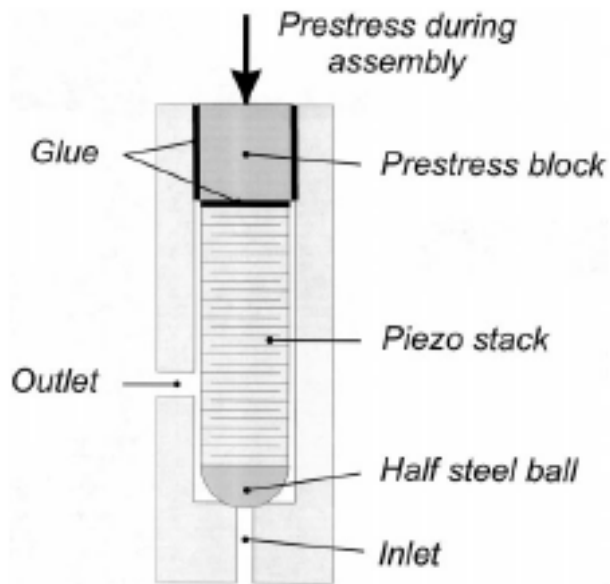
Zesilování výchylky – pákové mechanismy nebo hydraulika



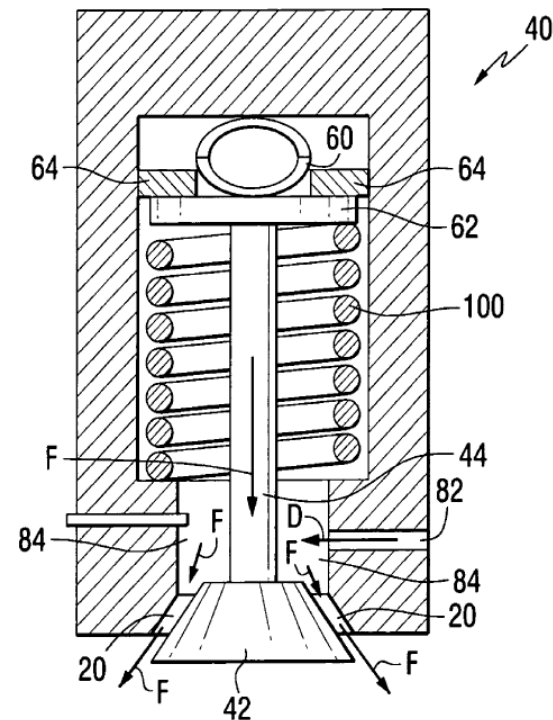


Piezelektrické ventily

Kuličkový ventil piezo-stack

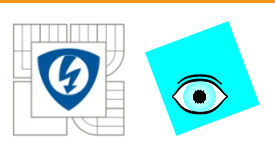


Kuželkový ventil 2x THUNDER

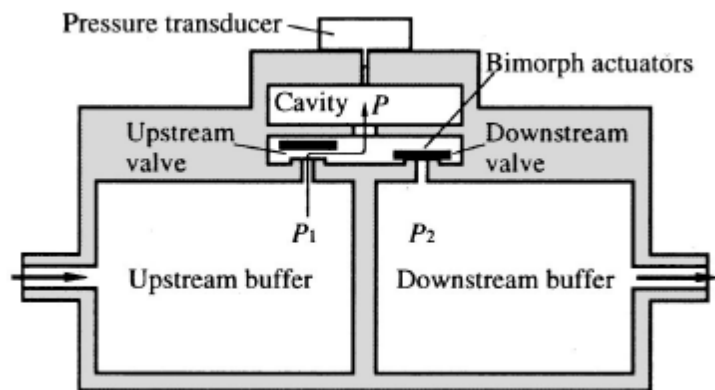


2.12.2011

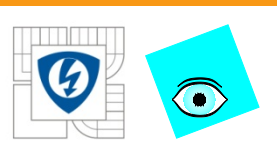
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Dávkování malých objemů tekutin – ohybové elementy mají vhodné parametry

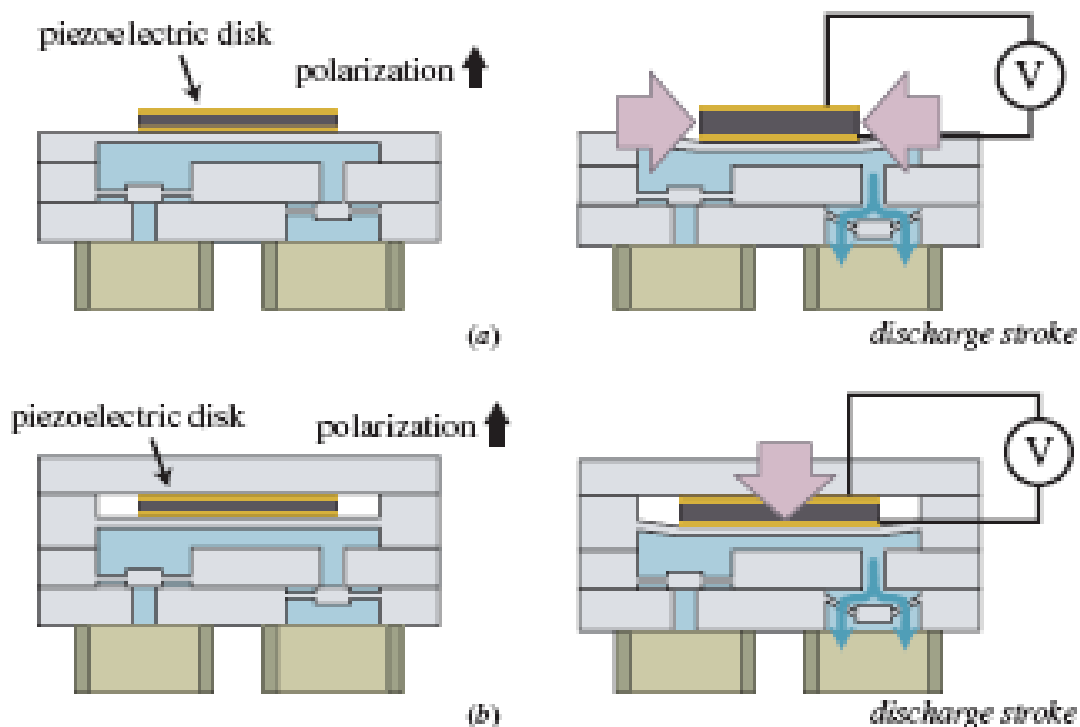


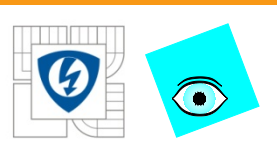
Bimorf jako aktivní prvek ventilu



Provozní mód piezoelektrického elementu

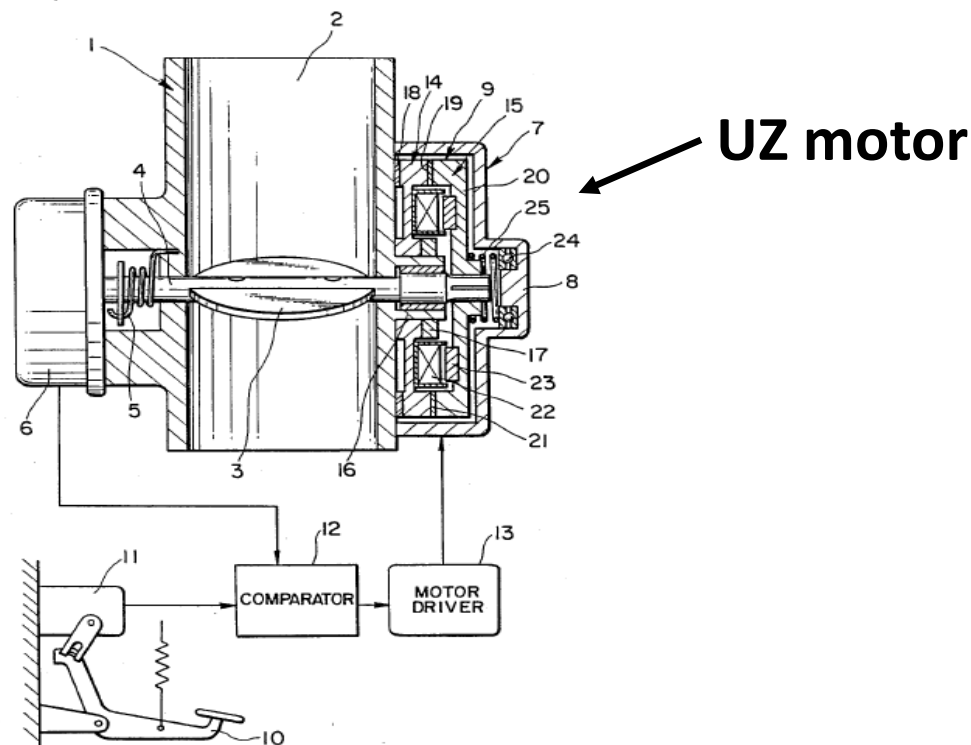
(a) příčný nebo (b) podélný mód piezoelementu -membrány

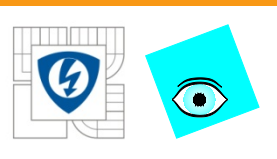




Ovládání škrtící klapky

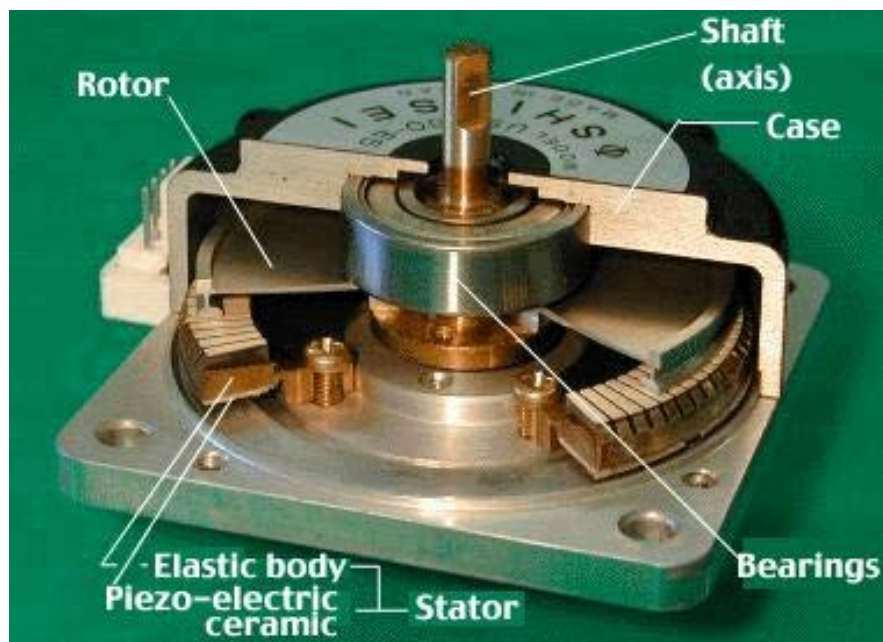
Škrtící klapka plynu ovládaná ultrazvukovým piezoelektrickým motorkem - US patent No. 4,915,074



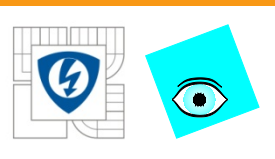


Ultrazvukový motorek

Ultrazvukové piezoelektrické motorky – běžící vlna
Shinsei motor

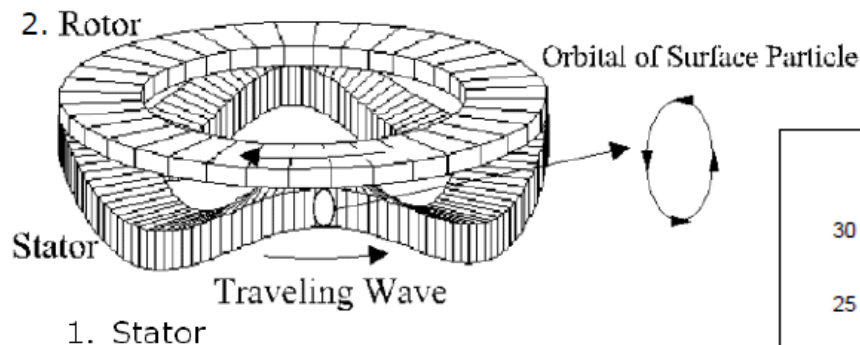


Obr. z www.krazytech.com

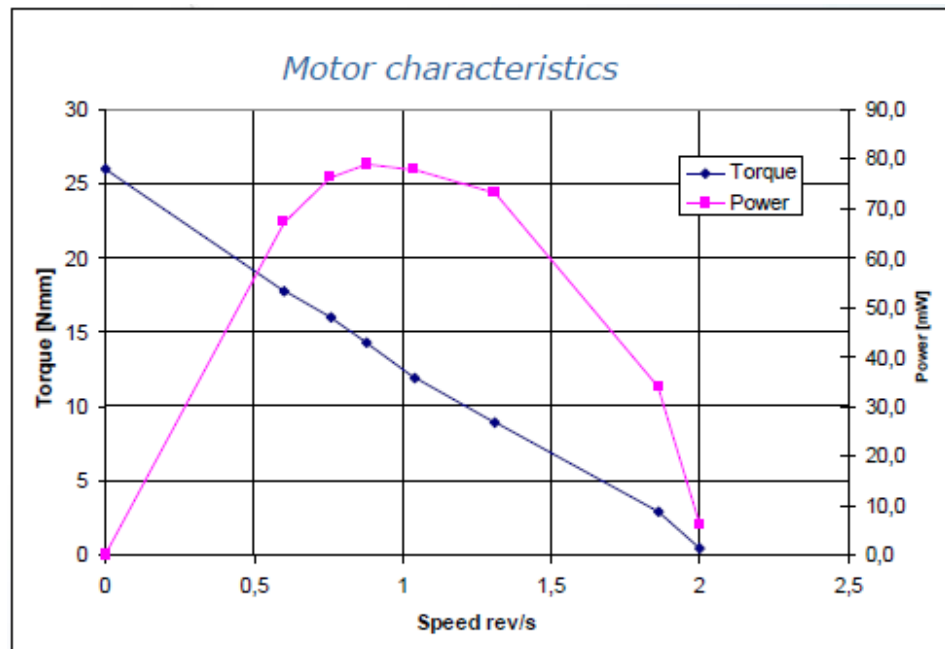


Ultrazvukový motorek

Ultrazvukový piezoelektrický motorek – eliptický pohyb povrchu statoru – tření o rotor



Příklad: průměr 30mm

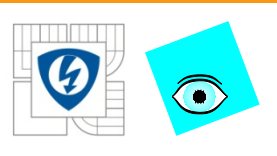


www.pcbmotor.com

2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Ultrazvukový motorek

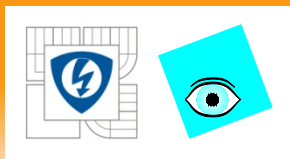
Langevinův měnič



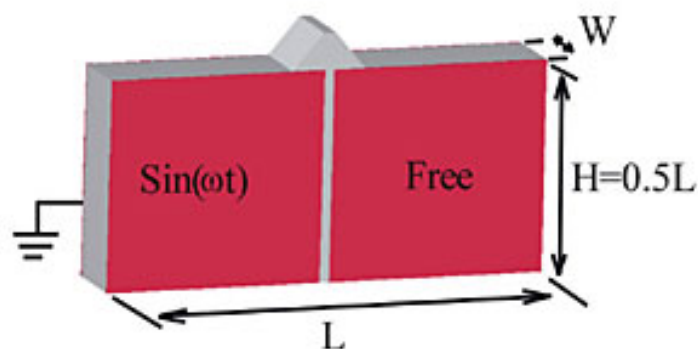
Paul Langevin
(1872 -1946)

rotor
stator
PZT keramika

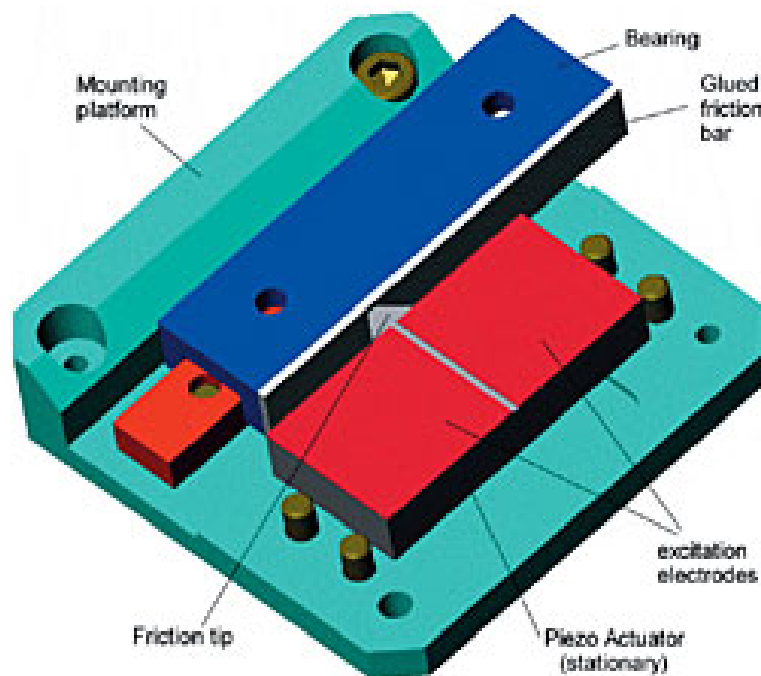


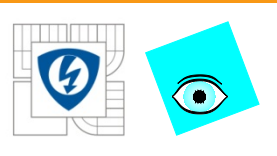


Eliptický pohyb hrotu upevněného na PZT keramice



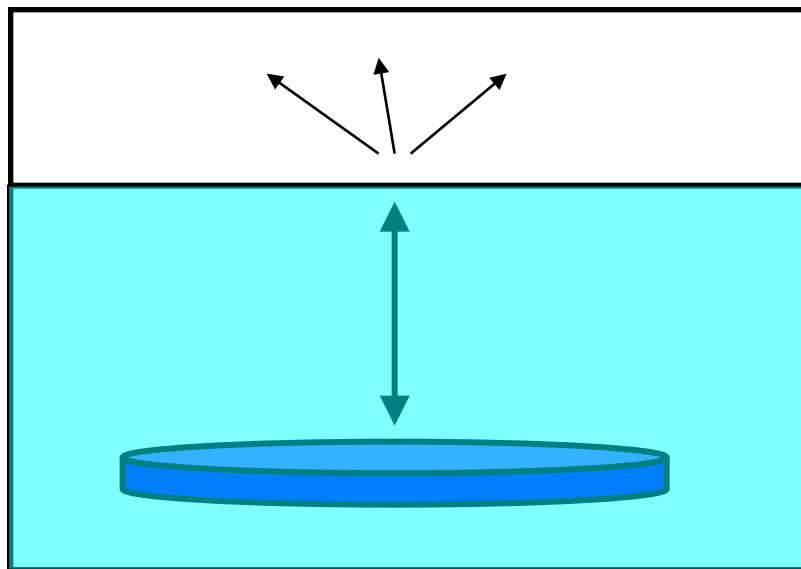
www.pi.ws



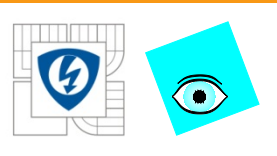


Rozprašování kapalin ultrazvukem

Aplikace léků na sliznice v malinkých kapkách
Zvlhčování vzduchu
Nanášení kapek na povrchy vláken atd.



Velikost kapek se dá
definovaně řídit – μm
Pro frekvence 1-2 MHz



Ultrazvukové rozprašování

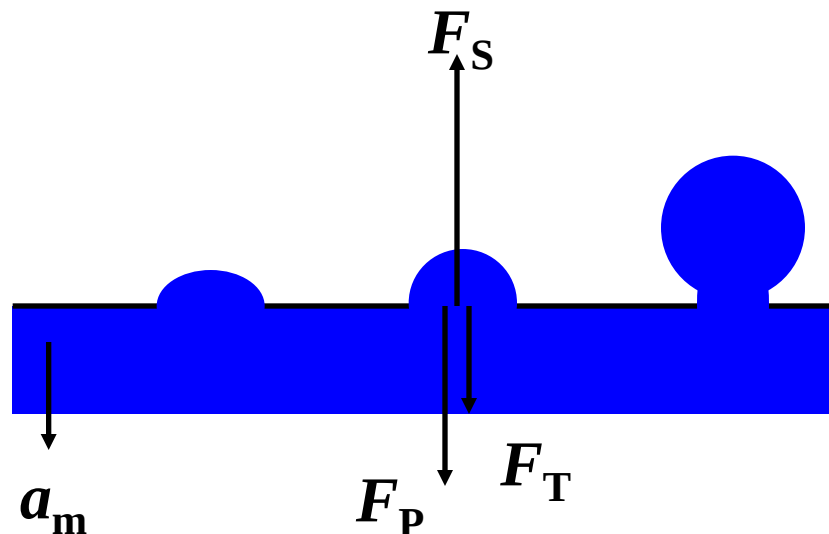
Povrch kapaliny se pohybuje díky ultrazvukové vlně

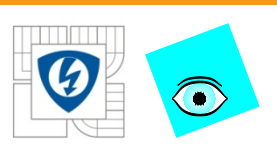
Střední velikost částic

$$r = 0.365 \sqrt[3]{\frac{\sigma}{\rho f_r^2}}$$

Úzké rozdělení velikosti částic

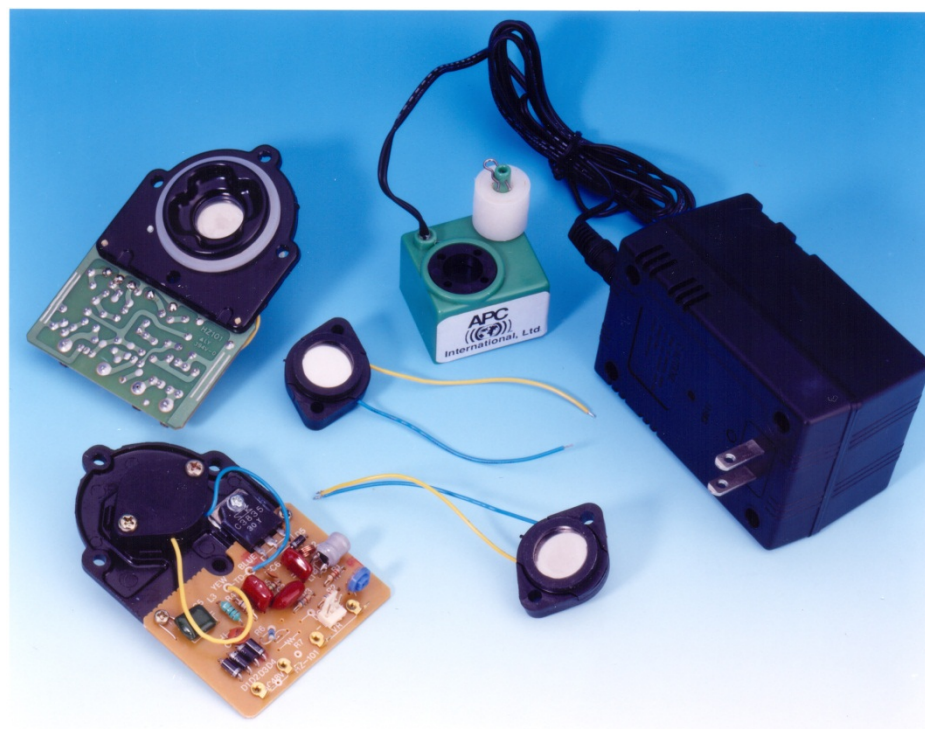
Dá se snadno kontrolovat atomizované množství tekutiny a velikost částic





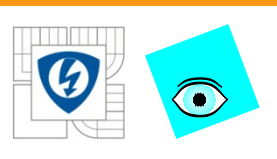
Atomizace kapalin

- Ultrazvukové zvlhčovače
- Inhalátory léků



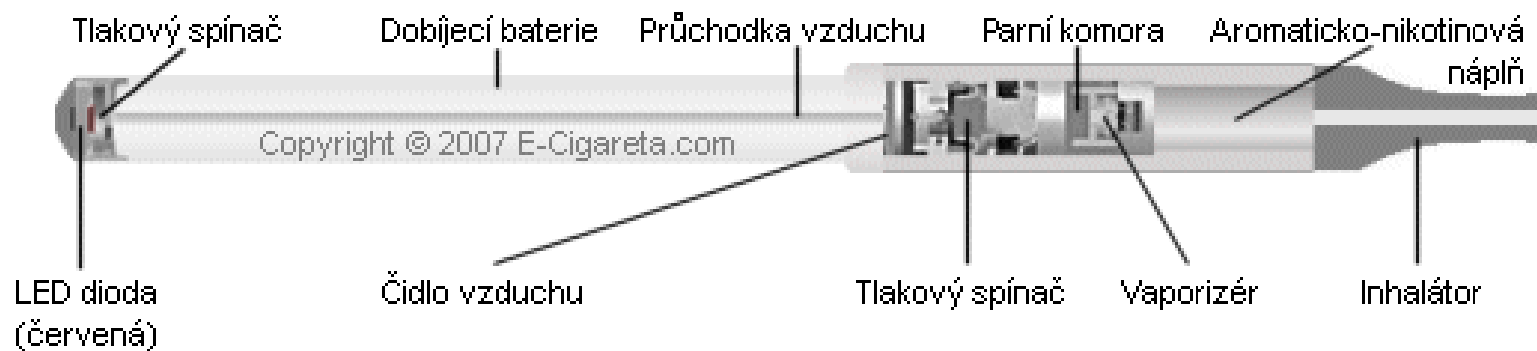
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Elektronická cigareta

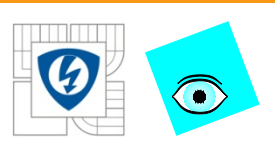
Atomizér uvnitř cigarety



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

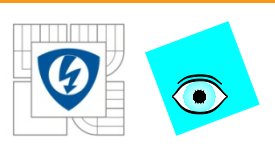




Generace a aplikace ultrazvuku

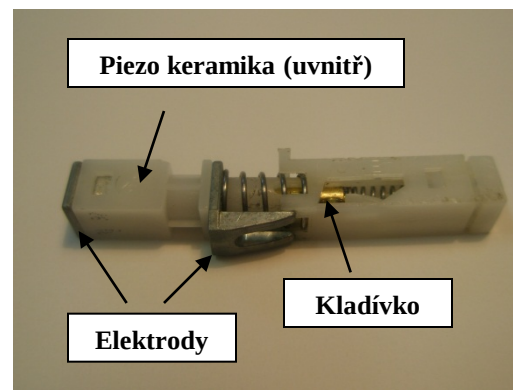
- Lékařský – diagnostický, léčebný
- Technické použití pro svařování, NDT, sonochemii, ...

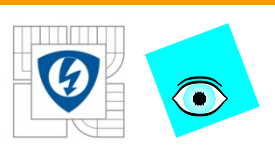




Piezelektrické zapalovače

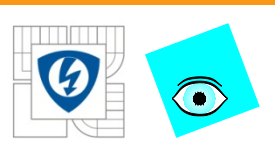
Výboj mezi elektrodami, náboj vzniká piezelektricky
úderem kladívka mechanickým tlakem



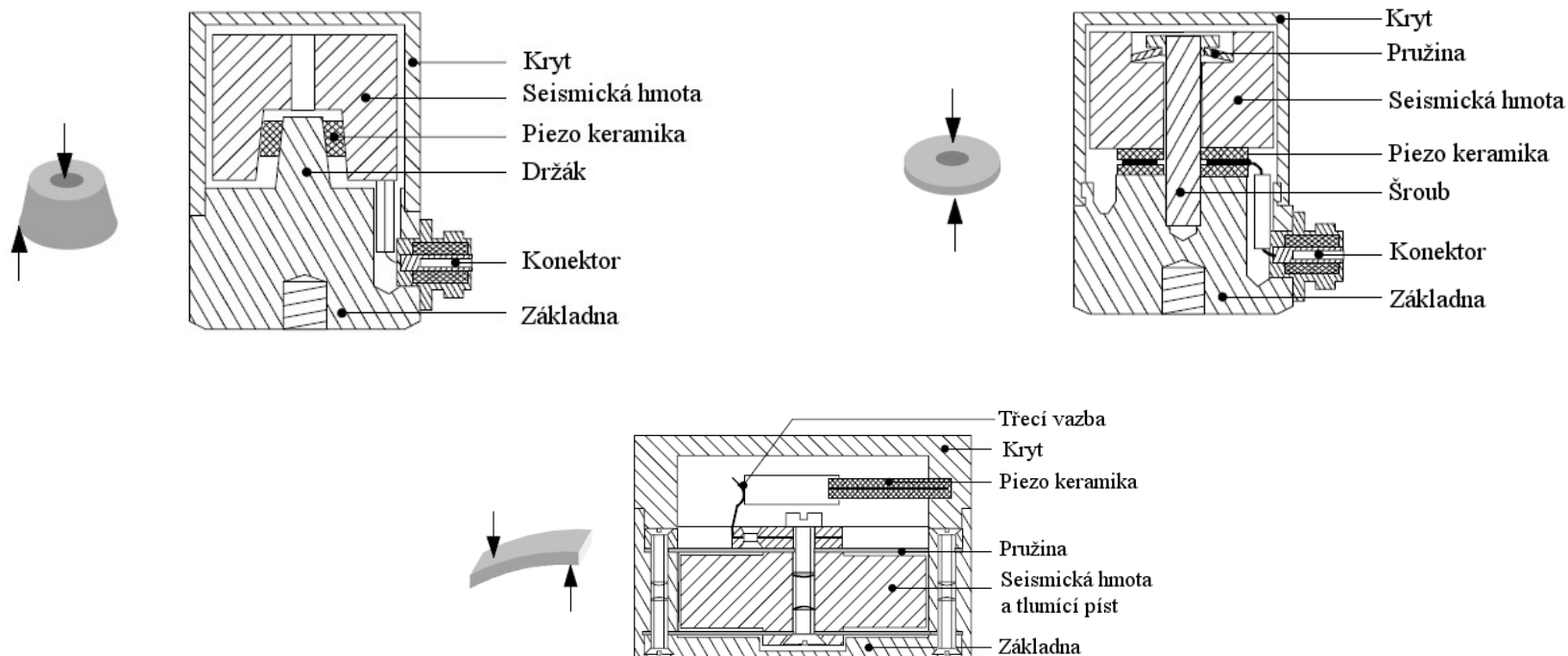


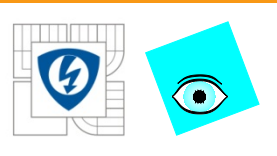
Senzory síly, tlaku, zrychlení (např. Kistler, Švýcarsko)





Deformace piezoelektrického prvku se seismickou hmotou





Aplikace pyroelektřiny

- IČ senzory pro dálková ovládání
- Proximity sensor – ovládání dveří, střežení prostor
- Noční vidění – kamery
- Měření rozdělení teploty - termokamery