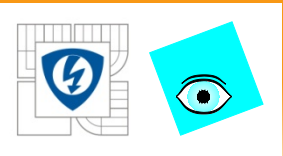


Doporučená literatura

- J.Zelenka: Piezoelectric resonators, Elsevier, 1986
- A.H.Meitzler, H.M.O'Brian, H.F.Tiersten: Definition and measurement of radial mode coupling factors in piezoelectric ceramic materials with large variations in Poisson's ratio, IEEE Trans. Sonics Ultrason. **SU-20**, 3 (1973) 233-239
- N.T.Adelman, Y.Stavsky, E.Segal: Radial vibrations of axially polarized piezoelectric ceramic cylinders, J.Acoust.Soc.Am. **57**, 2 (1975) 356-360
- A.Ballato, J.Ballato: Accurate electrical measurements of modern ferroelectrics, Ferroelectrics **182** (1996) 29-59
- IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Determination of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants—The Electromechanical Coupling Factor, Proceedings IRE (1958) 764–778
- P.Hána, L.Burianová, D.Barošová, J.Zelenka, Ferroelectrics **224** (1999) 39–46
- N.T.Adelman, Y.Stavsky: Flexural-extensional behavior of composite piezoelectric circular plates, J.Acoust.Soc.Am. **67**, 3 (1980) 819-822
- J.G.Smits, A.Ballato: Dynamic admittance matrix of piezoelectric cantilever bimorphs, J.Microelectromechanical Systems **3**, 3 (1994) 105-112
- J.G.Smits, S.I.Dalke, T.K.Cooney: The constituent equations of piezoelectric bimorphs, Sensors and Actuators A **28** (1991) 41-61
- Q.M.Wang, L.E.Cross: Performance characteristics of piezoelectric cantilever bending actuators, Ferroelectrics **215** (1998) 187-213

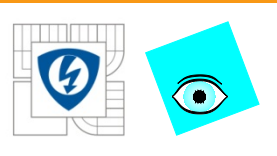


CHARAKTERIZACE MATERIÁLŮ A ELEMENTŮ

2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



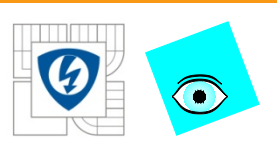


Měření materiálových vlastností

- Polarizace keramiky a krystalů
- Hysterezní smyčky
- Tenzory materiálových vlastností (rezonančně, interferometricky, hydrostaticky, ultrazvukově atd.)
- Teplotní závislosti materiálových vlastností

Charakterizace a testování parametrů piezoelektrických struktur

- Ohybové aktuátory
- Piezoelektrické transformátory
- Měření viskozity piezoelektrickým bimorfem



- **Stejnoseměrné napětí**

VN zdroj Spellman 30kV/10mA

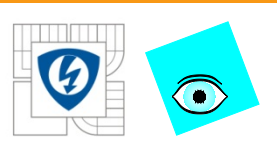
Vhodný držák

- **Střídavé napětí a pulsy**

VN zesilovač Matsusada AMT-5B20 ($\pm 5\text{kV}$, 20mA, $< 20\text{kHz}$)

Magnetické míchadlo s ohříváčem Heidolph MR 3001K (800W)

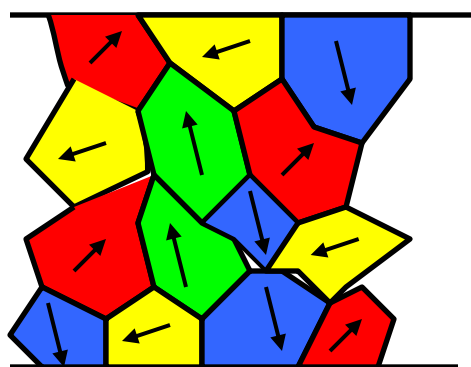
Silikonový olej (Lukosiol M50, nehořlavý do 200°C) – izolace proti průrazu okolním prostředím



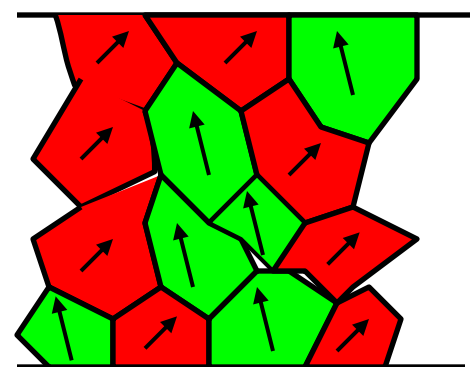
Polarizace keramiky

Složení polykrystalu ze zrn (zrno o velikosti 1-10 μm)

- Polarizace elektrickým polem – ferroelektrické látky (∞mm)



E

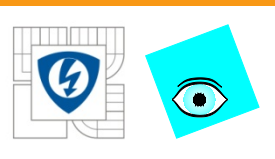


P_s

Před polarizací

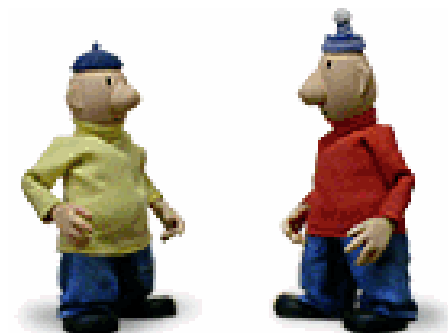
po polarizaci

- Polarizace jinými poli (mechanicky, injekcí náboje)



Polarizace PZT keramiky

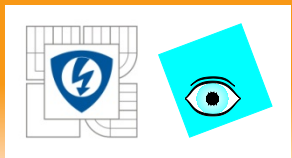
Intenzita elektrického pole 2-4kV/mm, při teplotách 120-140°C



2.12.2011

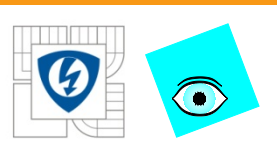
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

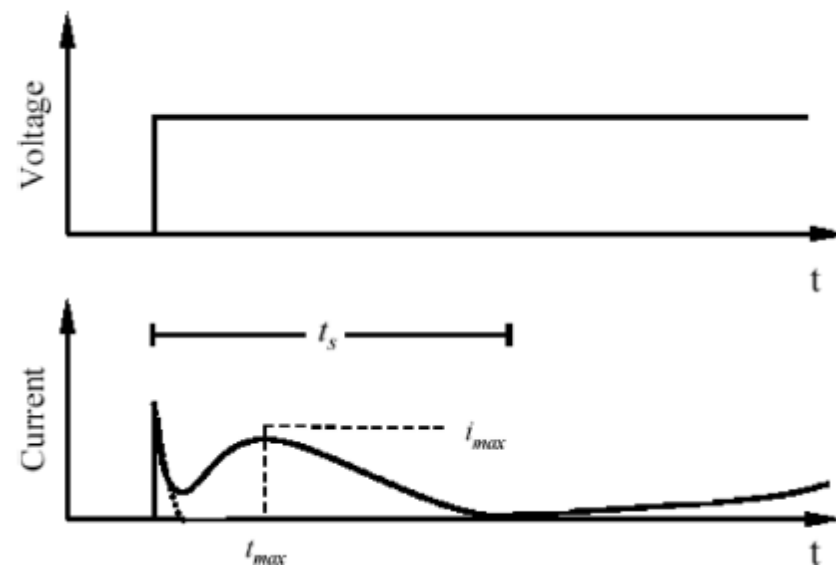
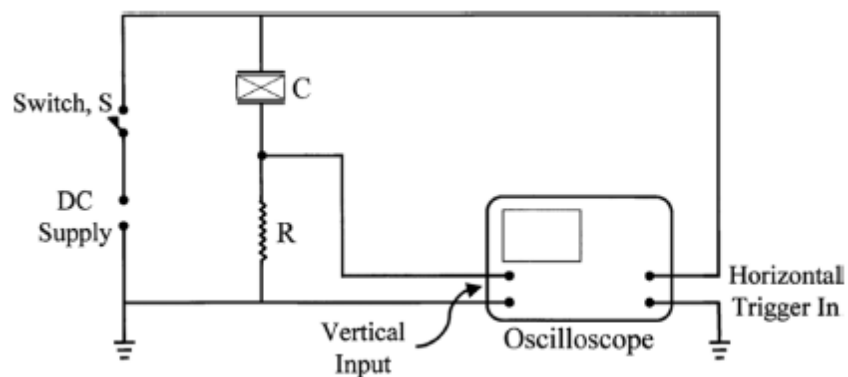


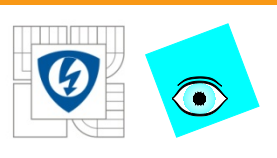
Pulzní polarizace

Aplikace pulzu různých tvarů

Merzův obvod

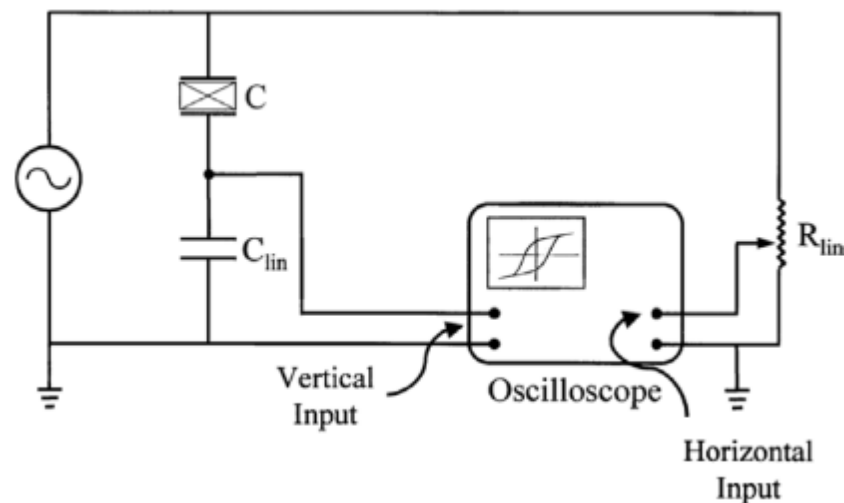
$$i_{\max} \propto \frac{1}{t_s} = \frac{1}{t_{\infty}} \exp\left(\frac{-\alpha}{E}\right)$$





Hysterezní smyčky

Sawyerův - Towerův obvod

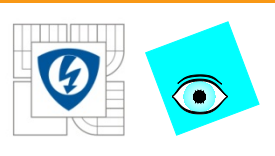


VN zesilovač Matsusada AMT-5B20 ($\pm 5\text{kV}$, 20mA , $<20\text{kHz}$)

Kapacitní dekáda Cosinus C-250 (0.1nF - $11\mu\text{F}$)

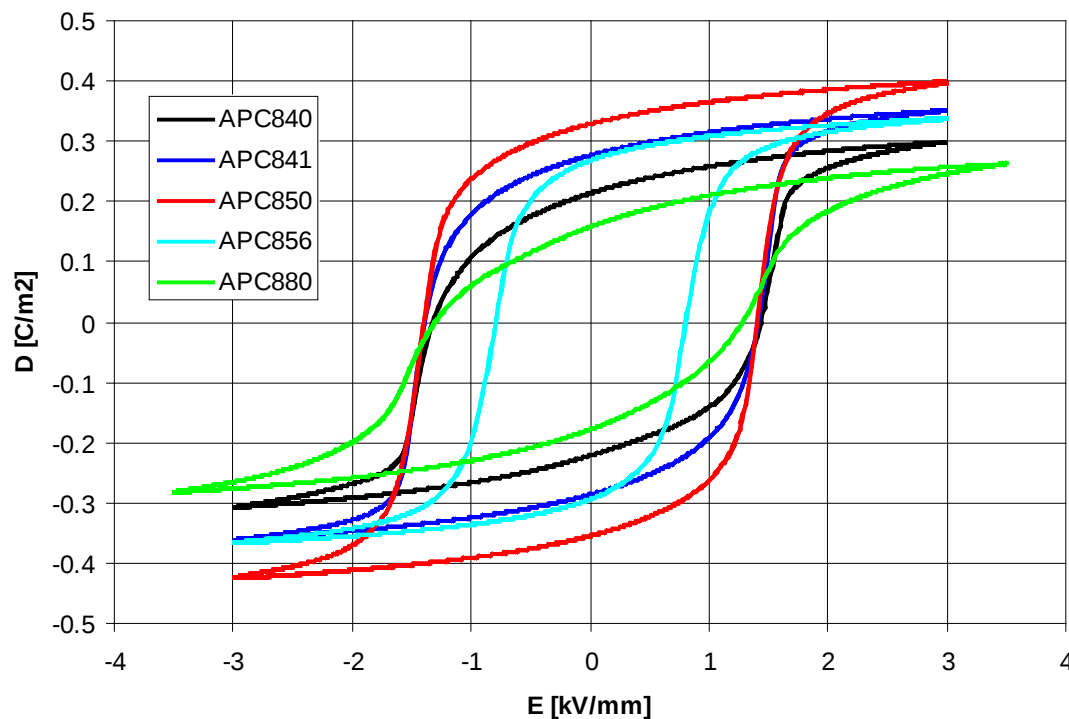
Magnetické míchadlo s ohříváčem Heidolph MR 3001K (800W)

Silikonový olej (Lukosiol M50, nehořlavý do 200°C) – dostatečná elektrická pevnost

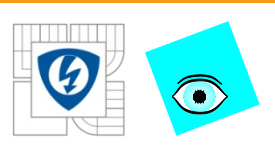


Typický výsledek

Smyčky měřeny za pokojové teploty (23°C) a frekvenci 10Hz, PZT keramiky.



P.Půlpán, L.Rusin, J.Erhart, Japanese Journal of Applied Physics 47, 10 (2008) 7953-7958



Dynamická permitivita

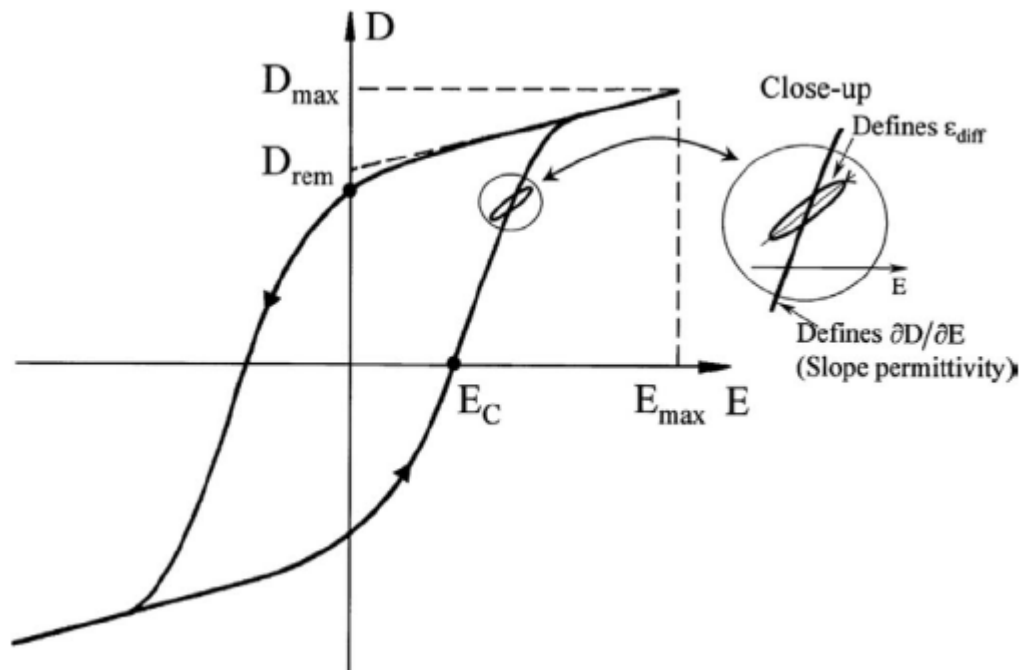
Draft 16 of A Working Document for a Proposed Standard to be entitled: IEEE Standard Definitions of Terms Associated with Ferroelectric and Related Materials, IEEE UFFC 50, 12 (2003) 1613

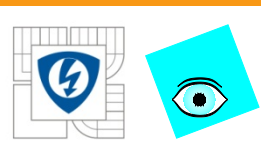
Statická permitivita

$$\varepsilon = \frac{D}{E}$$

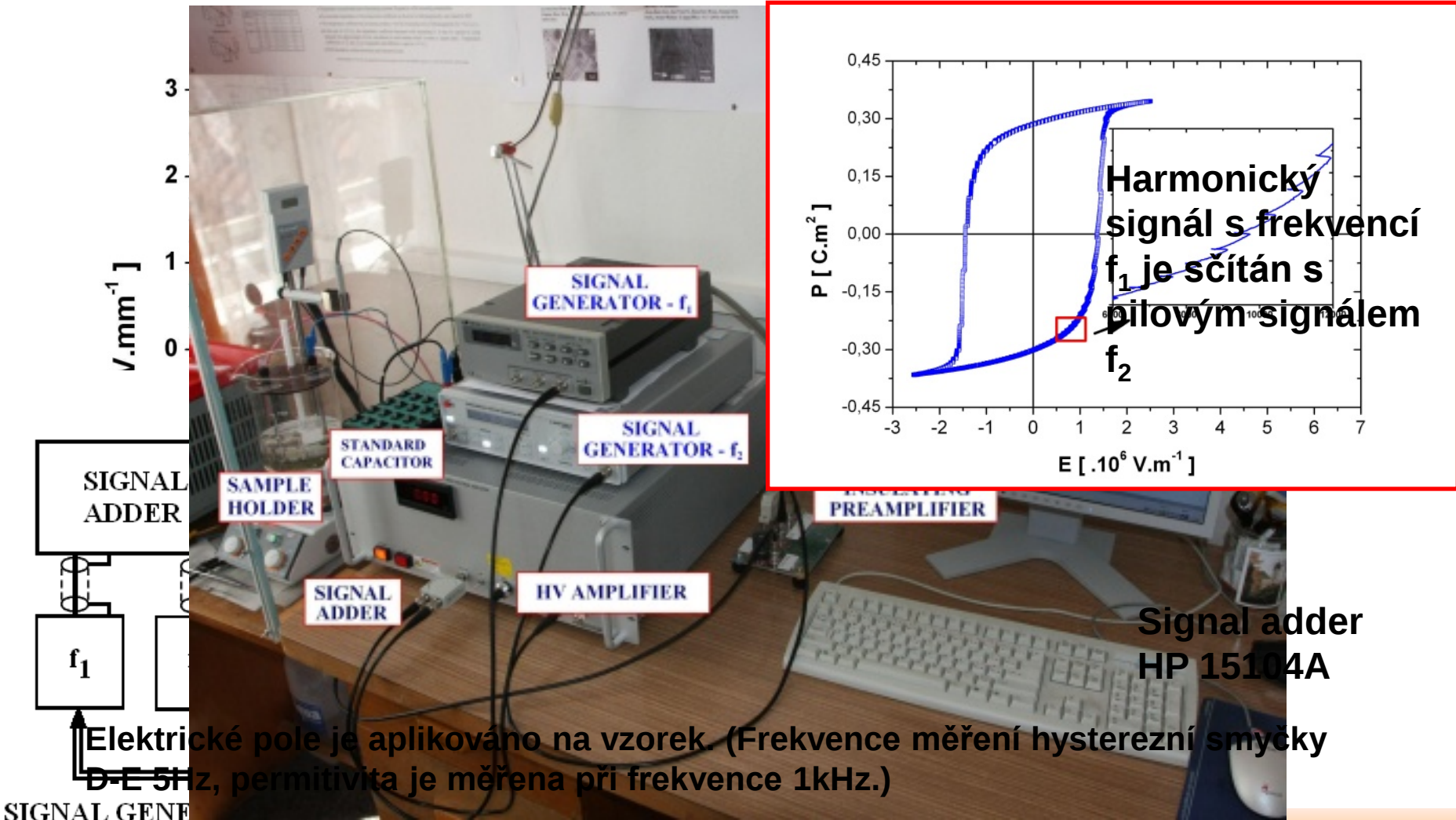
Dynamická permitivita

$$\varepsilon = \frac{\partial D}{\partial E}$$



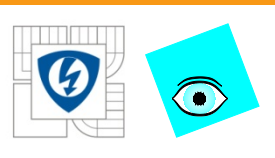


Měření dynamické permitivity – S.Panoš

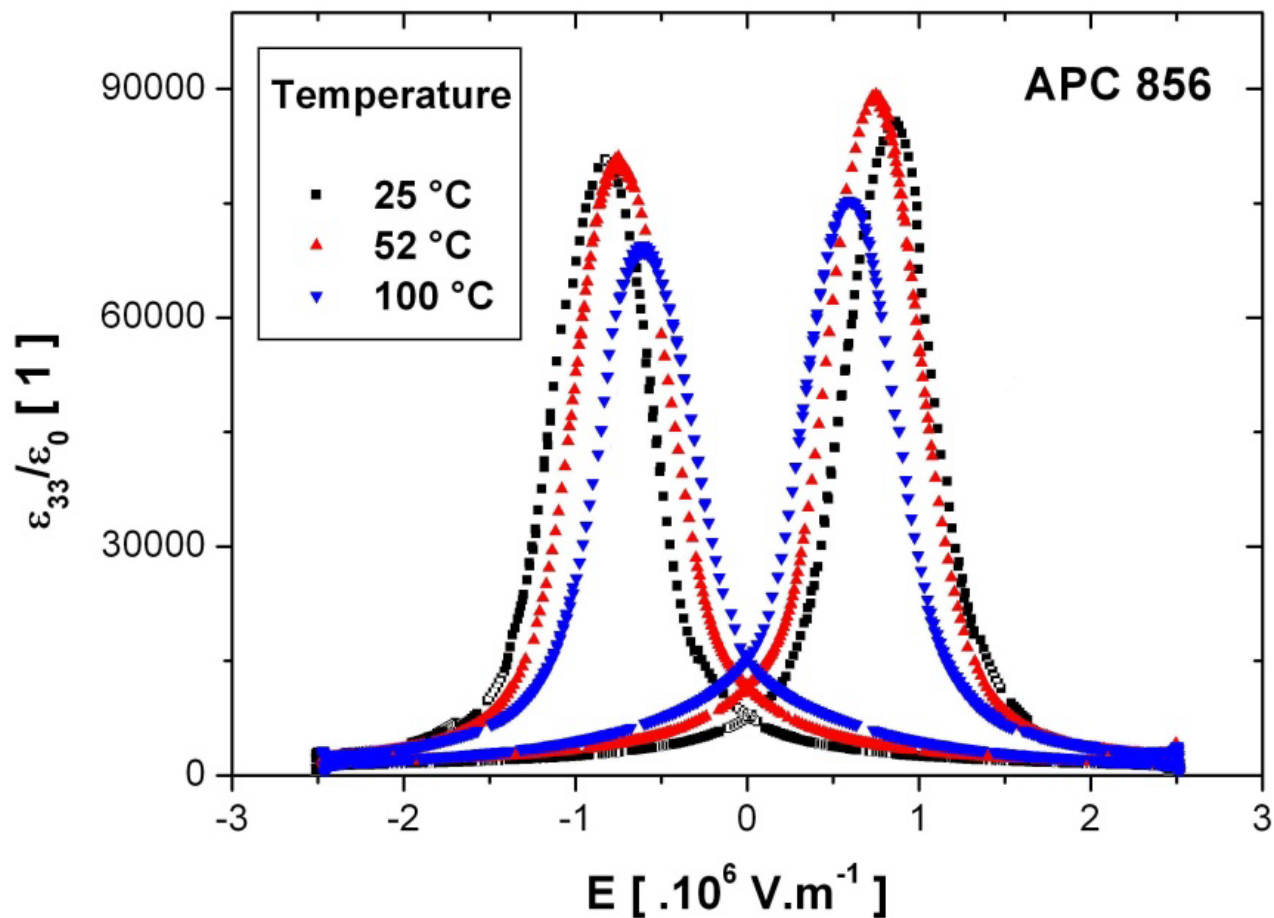


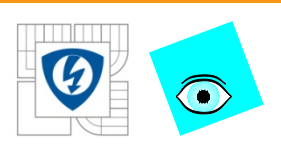
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Typický výsledek – S.Panoš

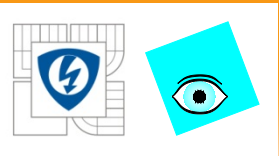




Měření piezoelektrických vlastností

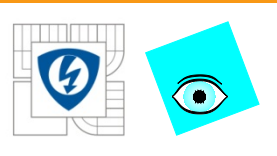
Využívá se přímého nebo obráceného jevu

- Rezonanční metody
- Hydrostatická komora
- Laserová interferometrie
- Ultrazvuk (např. pulse-echo)
- d_{33} -metr (jednosměrný tlak)
- Kvazistatické metody (lock-in)

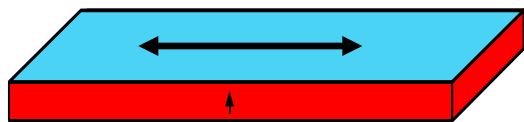


Rezonanční měření

- impedanční analyzátor Agilent 4294A (40Hz-110MHz)
- starší analyzátory Tesla BM650 (500kHz-110MHz), Tesla BM507 (5Hz-500kHz) + čítač HP5326B
- Starší LCR metr HP4261A (120Hz nebo 1kHz, sériový nebo paralelní obvod)
- Nový LCR metr GW Instek LCR-821 (12Hz-200kHz v 503 krocích)

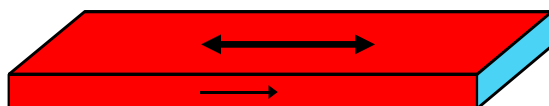


Standardní rezonátory



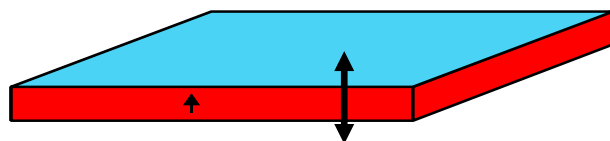
$$(l/t)^2 > 10, (l/w)^2 > 10$$

$$w/t > 2$$



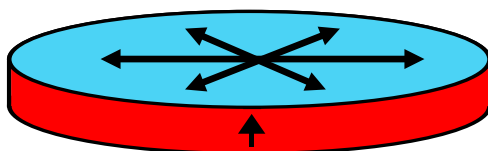
$$(l/t)^2 > 10, (l/w)^2 > 10$$

**ANSI/IEEE
Std 176-1987
IEEE Standard on
Piezoelectricity**



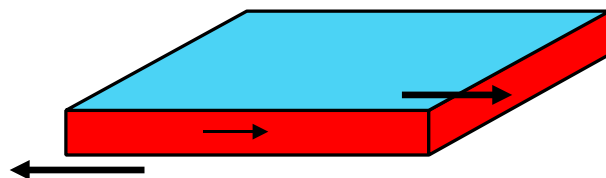
$$a/t > 10$$

**IRE Std.1961
Measurements of
Piezoelectric ceramics**

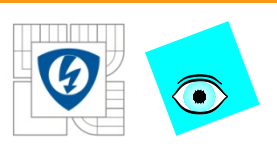


$$d/t > 20$$

$$d/t > 40, \text{ vyšší harmonické}$$

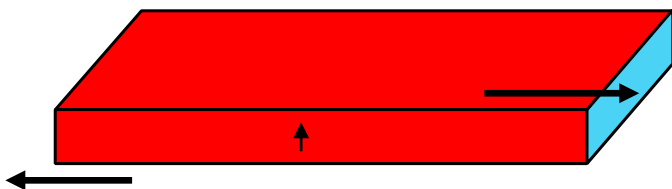


$$l/t > 10$$

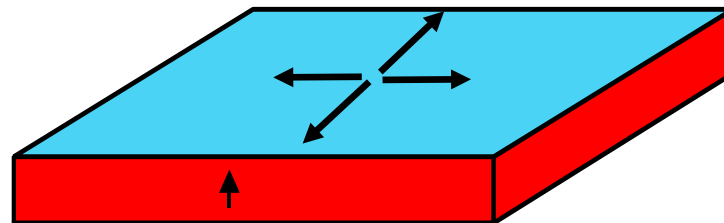


Nestandardní rezonátory

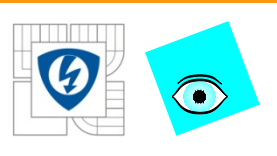
Tenká deska/tyčinka
Tloušťkově střižné kmity



Čtvercová deska
Obrysové kmity



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

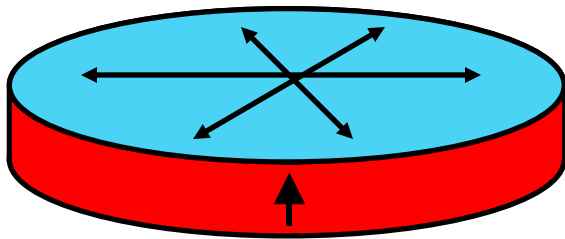


Rezonanční metoda

Mechanická rezonance buzená piezoelektricky

Příklad: keramický disk, radiální kmity

admittance



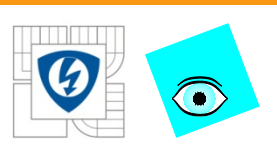
rezonance $Y \rightarrow \infty$

antirezonance $Y \rightarrow 0$

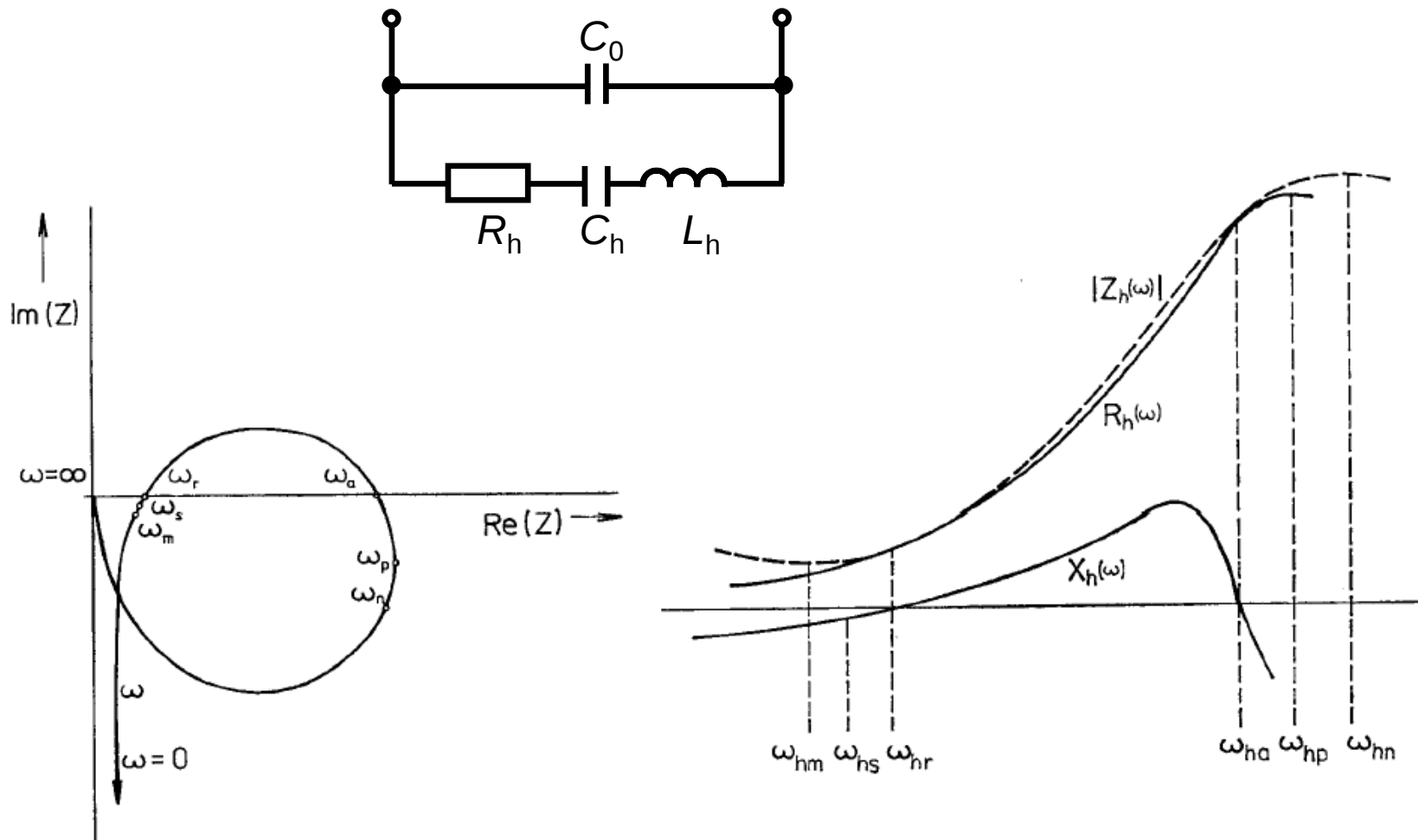
$$Y = j\omega C_0 \left[2(k^P)^2 \frac{J_1(\eta)}{(1 - \sigma^P)J_1(\eta) - \eta J_0(\eta)} - 1 \right]$$

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

$$\eta_r = 2\pi f_r r \sqrt{\frac{\rho}{C_{11}^P}}$$

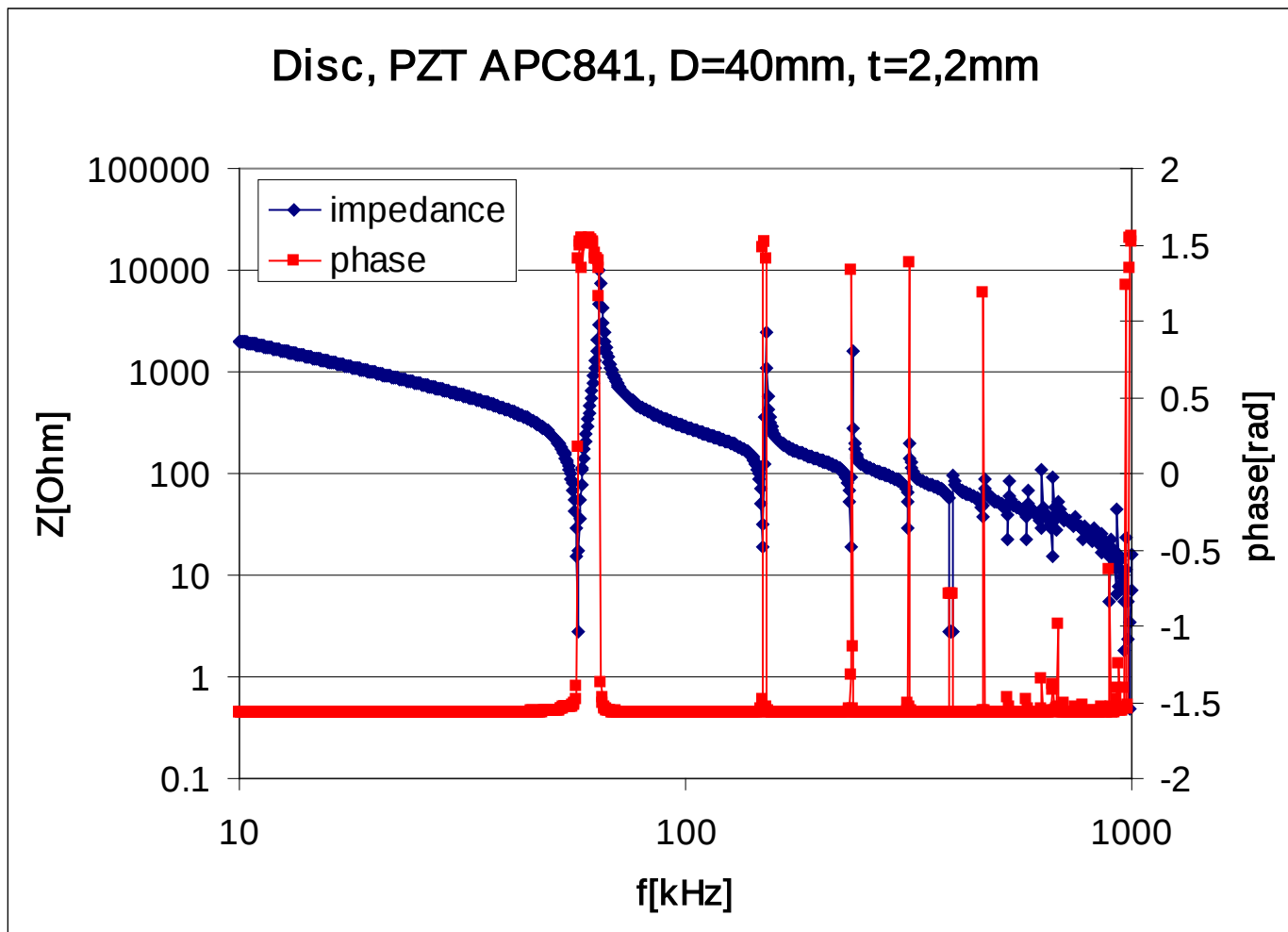
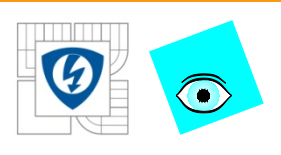


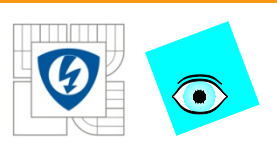
Rezonátor v blízkosti rezonance



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Hydrostatická komora

Přímý piezoelektrický jev – vzorek je pod všesměrovým tlakem v komoře, měřen je tlak a nabožová odezva vzorku

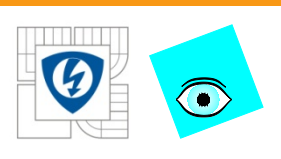
Hydrostatický tlak

$$\begin{pmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{pmatrix}$$

Hydrostatický piezoelektrický koeficient

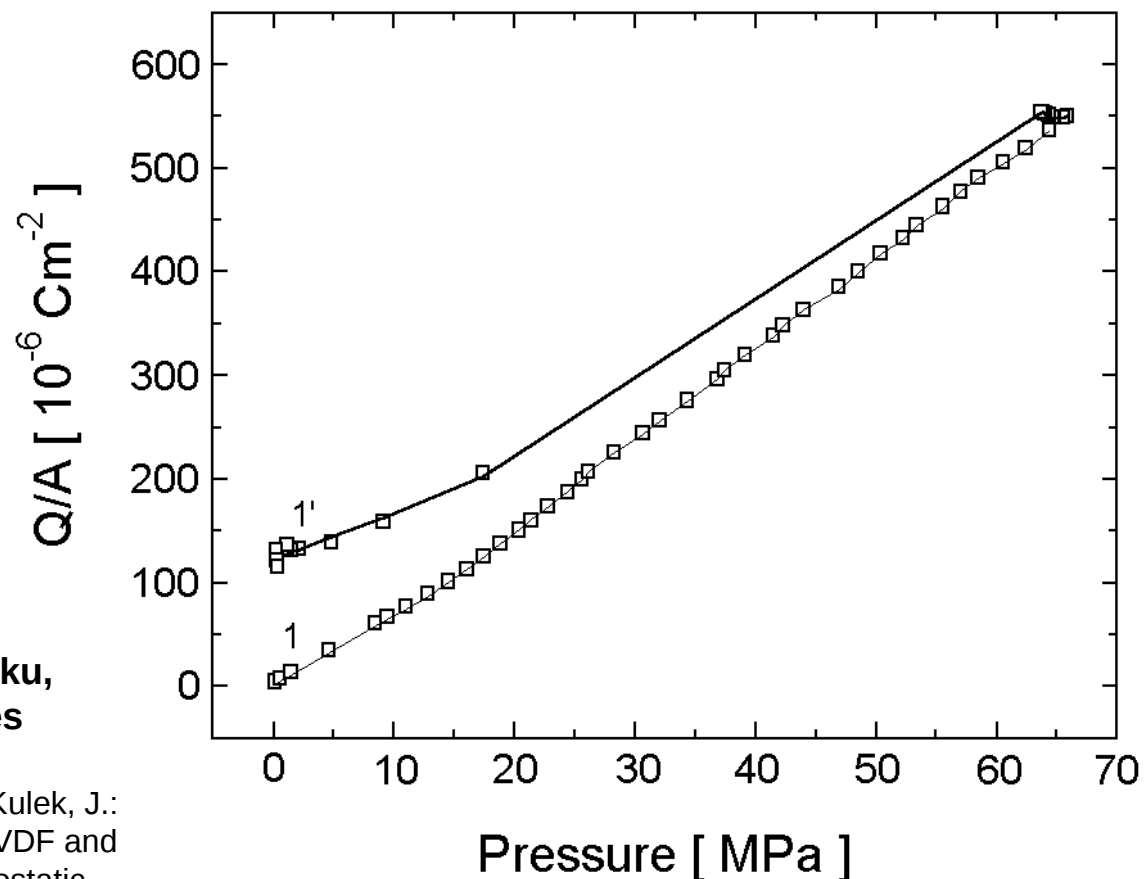
$$D_3 = d_h(-p)$$

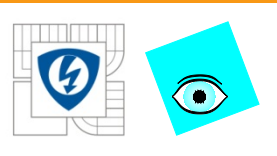
$$d_h = d_{31} + d_{32} + d_{33}$$



**Závislost nábojové hustoty na tlaku,
P(VDF-TrFE): 1 - vzrůst, 1' - pokles
tlaku.**

Burianová, L., Hána, P., Tyagur Y. I. and Kulek, J.:
Piezoelectric hydrostatic coefficients of PVDF and
P(VDF,TrFE) copolymer foils at high hydrostatic
pressures. *Ferroelectrics* **224** (1999), 29-38.



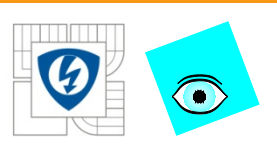


Laserová interferometrie

- Využívá se obrácený jev, výchylka měřena interferometricky

Výchylky 10^{-12} m až 10^{-5} m

- Kvazistatická metoda, lock-in
- Single- nebo double-beam (micro)interferometr
- Piezoelektrické, elektrostriční a elektrooptické materiálové koeficienty



Laserová interferometrie

Interference dvou svazků koherentního světla (bodově)

Intenzita

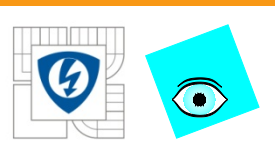
$$I = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} \cos(4\pi\Delta d / \lambda)$$

Pro malé výchylky a fázový posuv $\pi/2$ ve větvích LI

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min})4\pi\Delta d / \lambda$$

Malý AC signál – odezva interferenčního obrazce
měřeného fotodiodou, fázové zesílení odezvy lock-in

L.Burianová, M.Šulc, M.Prokopová: J.Europ.Ceram.Soc. 21 (2001) 1387-1390



Single-beam LI (Michelson)

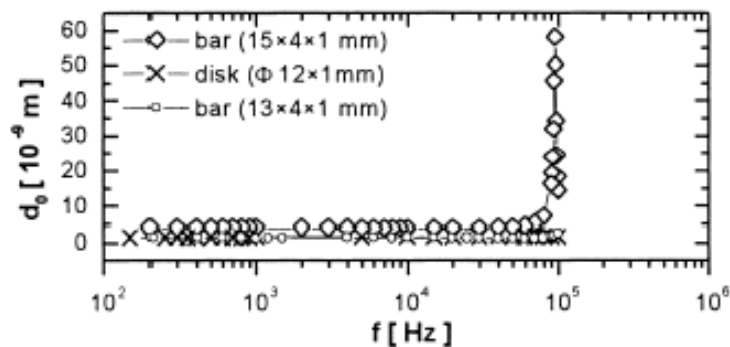


Fig. 3. The frequency dependence of displacement d_0 .

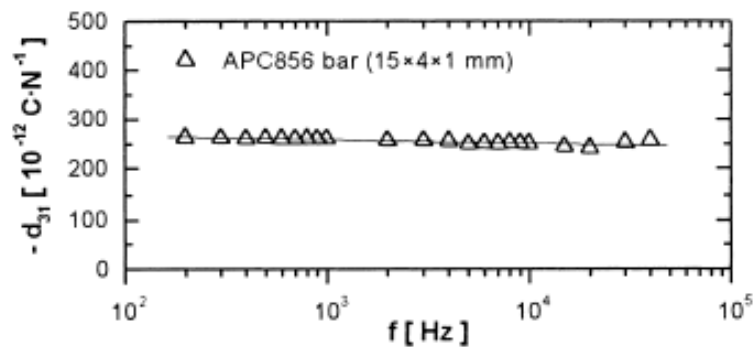


Fig. 4. The frequency dependence of piezoelectric coefficient d_{31} .

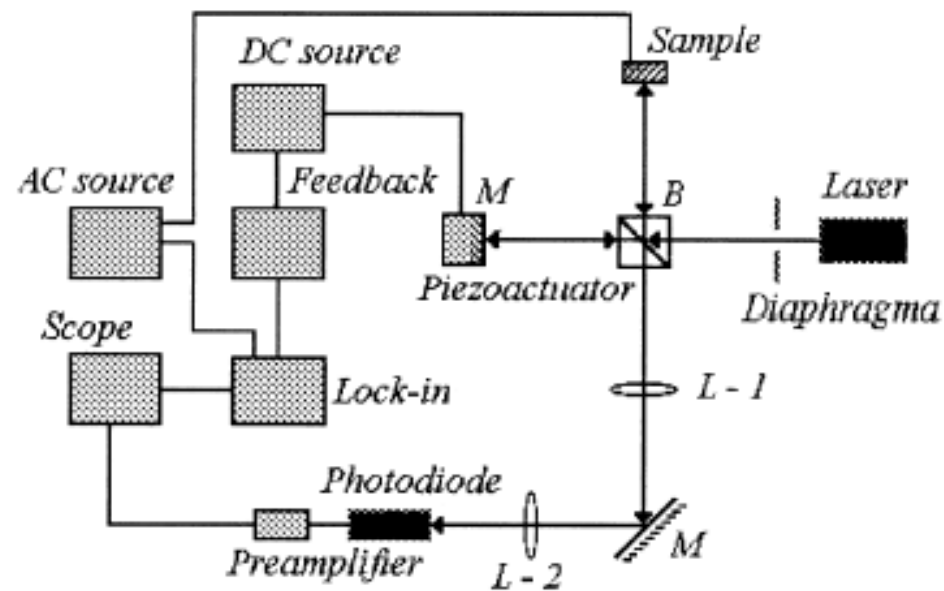
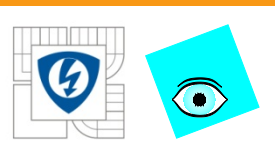


Fig. 1. Scheme of the single-beam laser interferometer.

L.Burianová, M.Šulc, M.Prokopová:
J.Europ.Ceram.Soc. 21 (2001) 1387-1390



Double-beam LI (Mach – Zehnder)

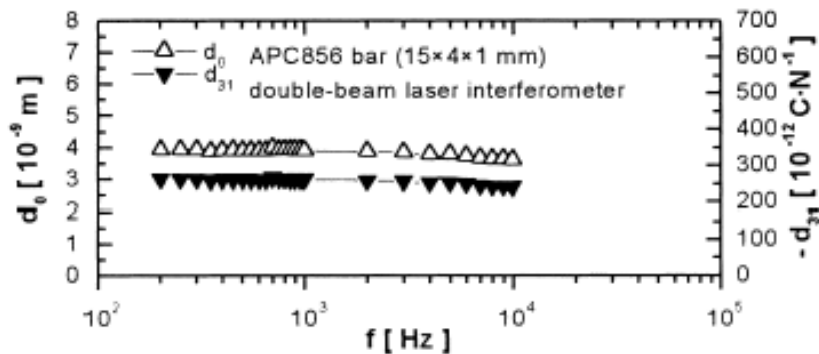


Fig. 5. Frequency dependence of displacement d_0 and d_{31} coefficient.

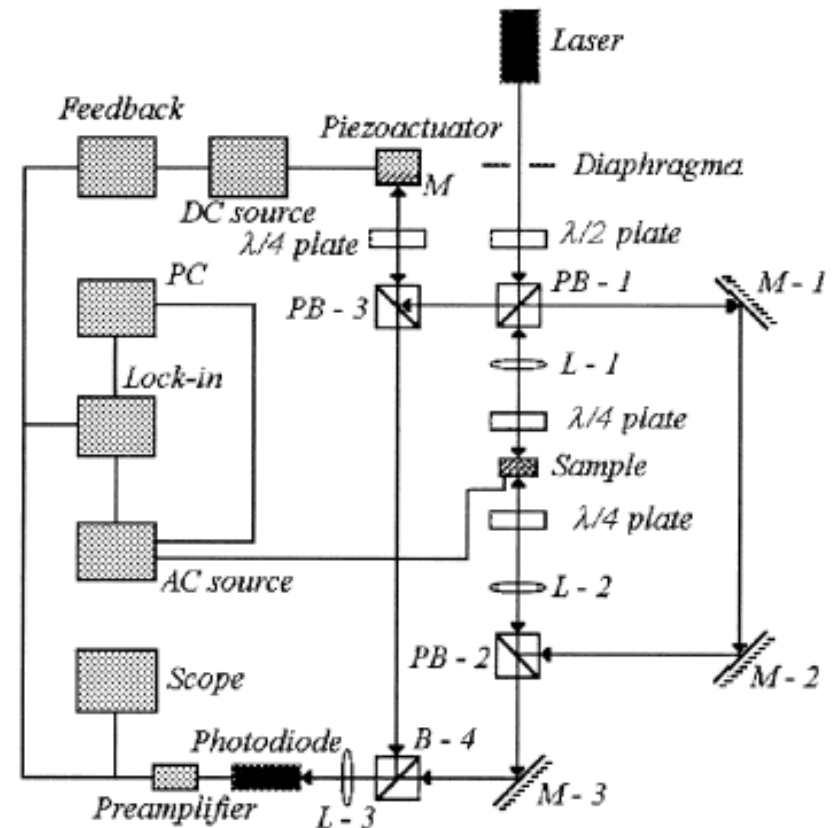
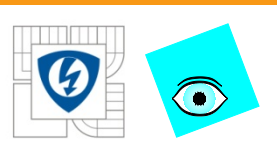


Fig. 2. Scheme of the double-beam laser interferometer.

L.Burianová, M.Šulc, M.Prokopová:
J.Europ.Ceram.Soc. 21 (2001) 1387-1390



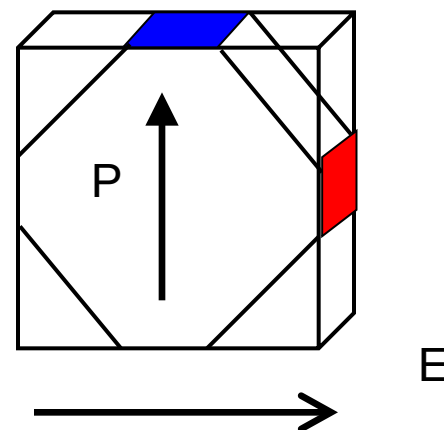
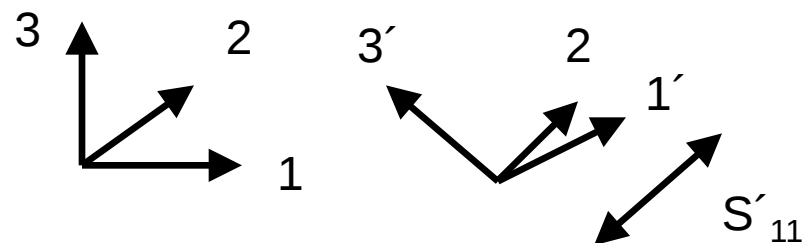
Měření d_{15} interferometricky

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

Rotace kolem osy 2 o 45°

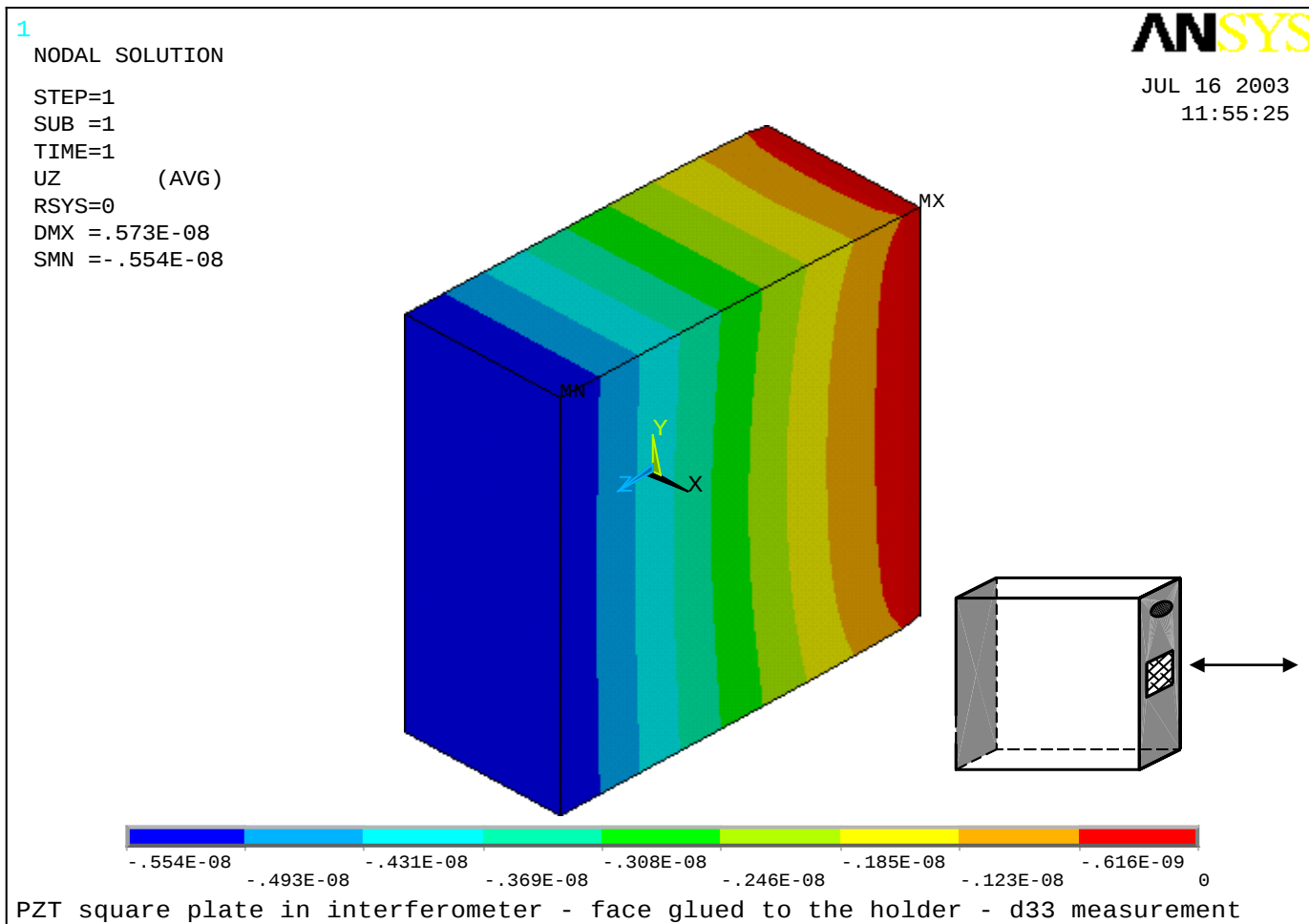
$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Měříme S_{11}' , dopočítáváme d_{15}



$$S_{11}' = \frac{1}{2} d_{15} E_1$$

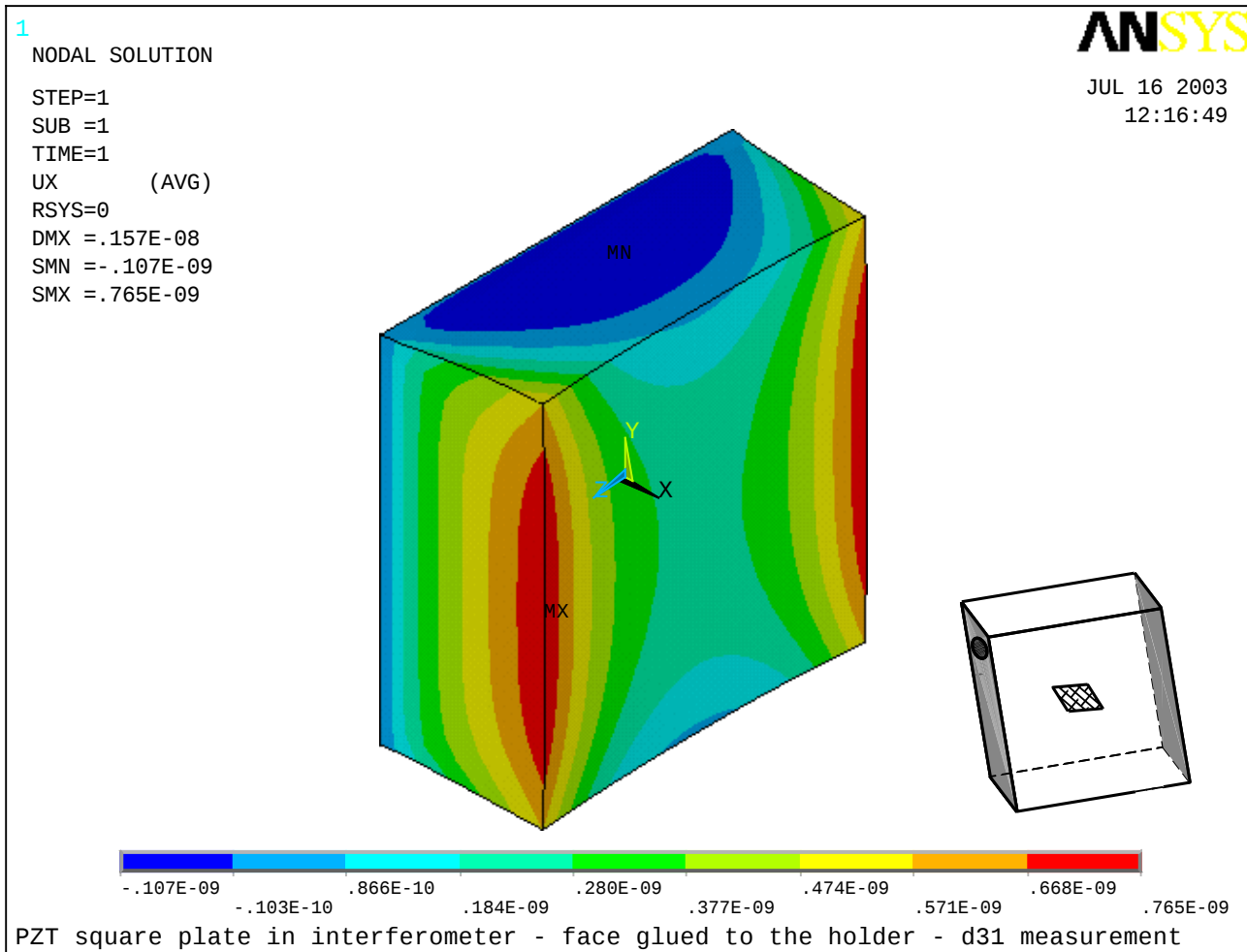
Simulace upevnění vzorku v interferometru – d_{33}



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

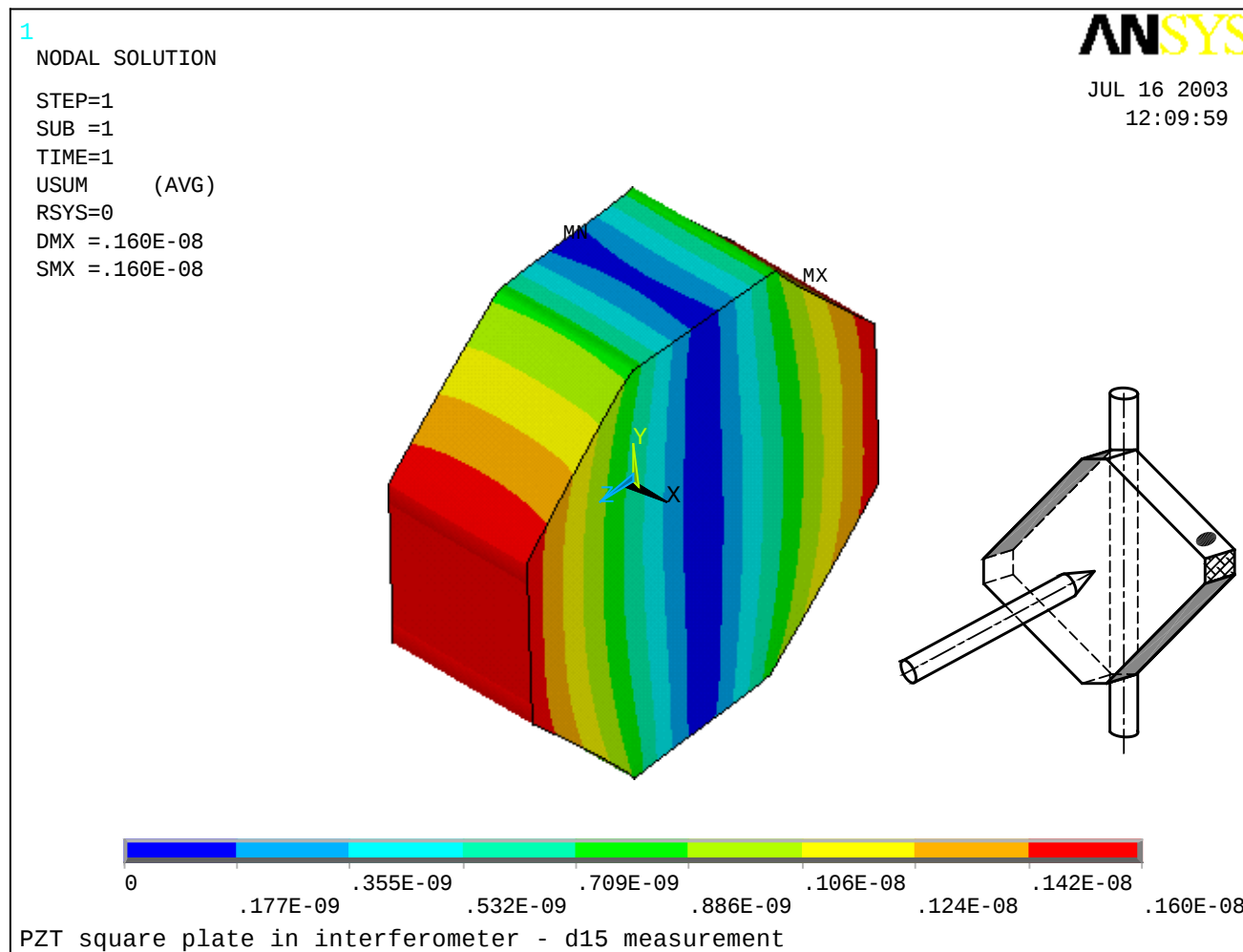
Simulace upevnění vzorku v interferometru – d_{31}



2.12.2011

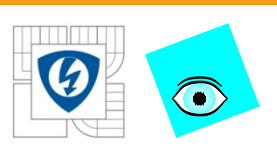
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Simulace upevnění vzorku v interferometru – d_{15}



2.12.2011

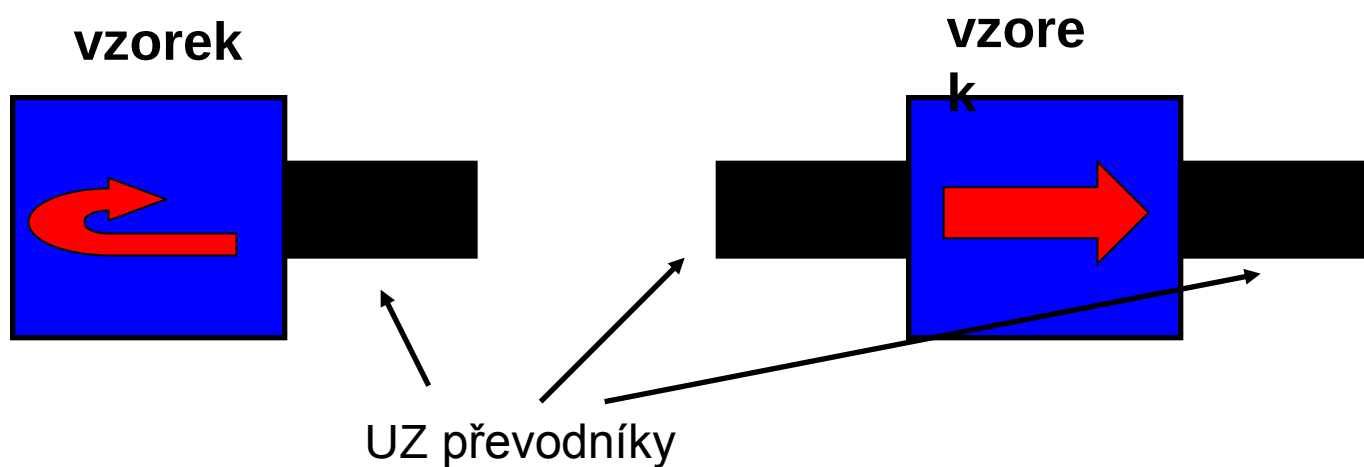
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



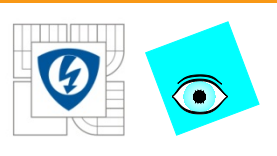
Ultrazvukové měření

Rychlost ultrazvukové vlny je funkcí elastických konstant, piezoelektrických modulů a permitivity

Metoda „pulse-echo“ (měření „time-of-flight“)



polarizace UZ – podélná nebo příčná vlna



Rychlost šíření ultrazvukové vlny

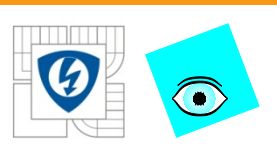
Christoffelův tenzor

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl}^E v_j v_l + \frac{e_{kij} v_k v_j e_{ikl} v_l v_i}{\varepsilon_{ik}^S v_k v_i}$$

Směr šíření vlny (propagation direction) $(v_1 \quad v_2 \quad v_3)$

Podmínka nalezení rychlostí a módů vln

$$\det(\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik}) = 0$$



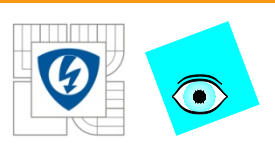
Příklad pro symetrii $\infty 2$

Materiálové tenzory

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \end{pmatrix}$$



Propagace vlny ve směru [100]

$$\Gamma \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{33} \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_{11} = c_{11}^E, \Gamma_{22} = c_{66}^E, \Gamma_{33} = c_{44}^E$$

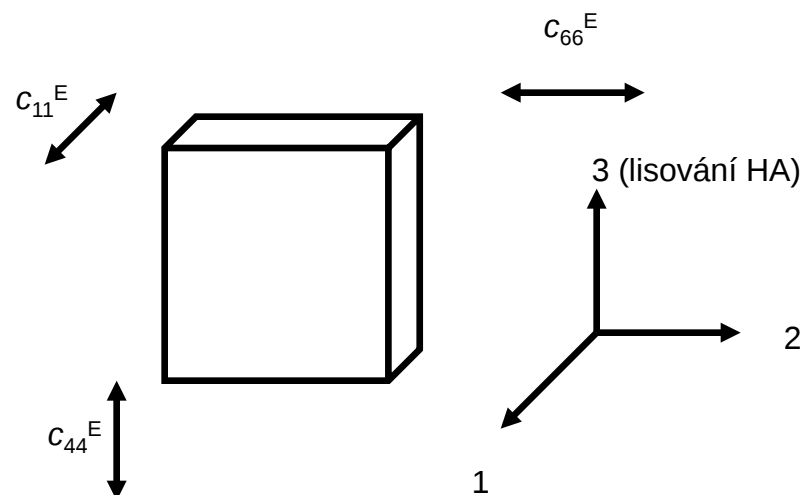
$$\Gamma_{12} = \Gamma_{13} = \Gamma_{23} = 0$$

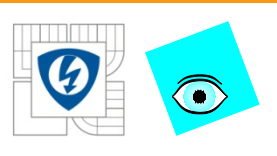
$$\rho v^2 = \Gamma_{11} \quad 1 \text{ podélný kmit}$$

$$\rho v^2 = \Gamma_{22} \quad 2 \text{ příčné kmity}$$

$$\rho v^2 = \Gamma_{33}$$

Piezoelektricky volné kmity





Propagace vlny ve směru [001]

$$\Gamma \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{33} \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_{11} = \Gamma_{22} = c_{44}^E, \Gamma_{33} = c_{33}^E$$

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{13} = \Gamma_{23} = 0$$

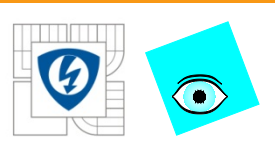
$$\rho v^2 = \Gamma_{11}$$

2 příčné kmity

$$\rho v^2 = \Gamma_{33}$$

1 podélný kmit

Piezoelektricky volné kmity



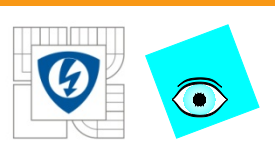
Propagace vlny ve směru [101]

$$\Gamma \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & \Gamma_{13} \\ 0 & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{13} & 0 & \Gamma_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} \Gamma_{11} &= \frac{1}{2}(c_{11}^E + c_{44}^E), \Gamma_{22} = \frac{1}{2}(c_{44}^E + \frac{e_{14}^2}{\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S}), \\ \Gamma_{33} &= \frac{1}{2}(c_{33}^E + c_{44}^E), \\ \Gamma_{12} &= 0, \Gamma_{13} = \frac{1}{2}(c_{13}^E + c_{44}^E), \Gamma_{23} = 0 \end{aligned}$$

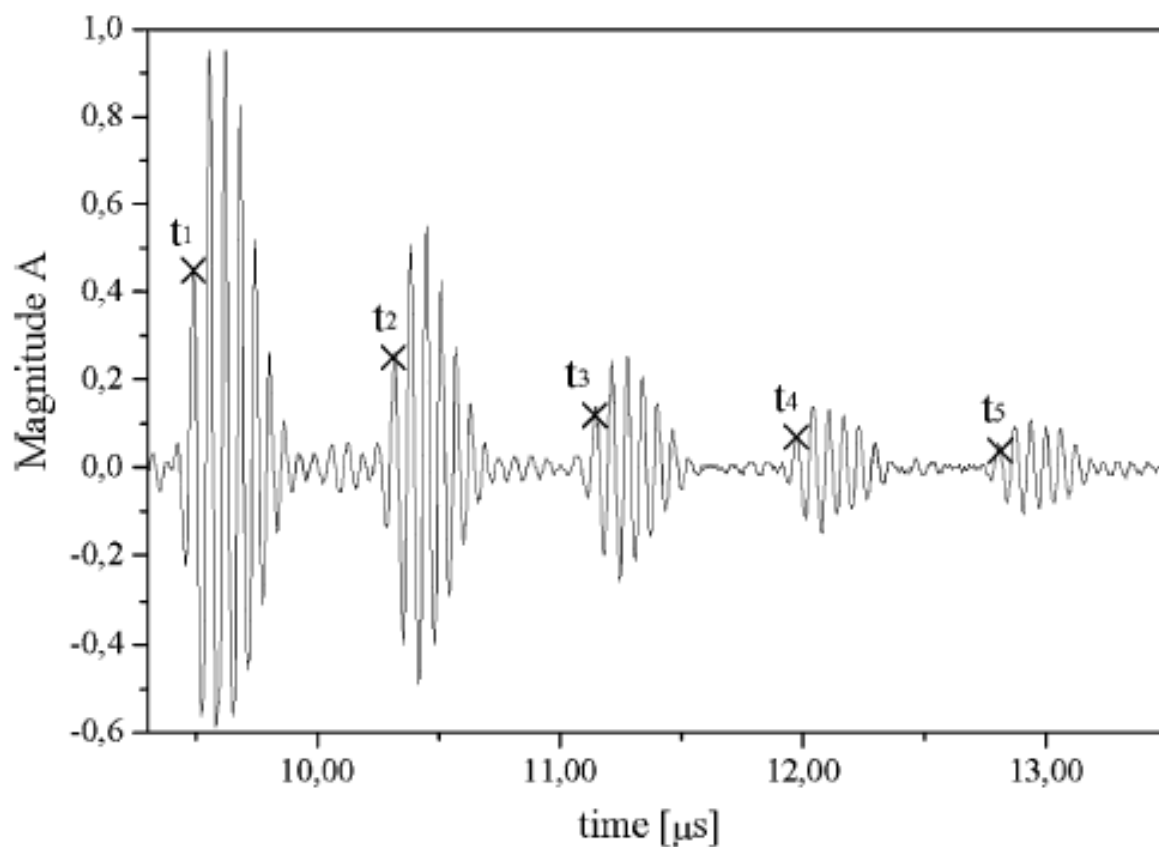
$$\rho v^2 = \Gamma_{22} \quad \text{Příčný kmit (piezoelektricky upnutý)}$$

$$\rho v^2 = \frac{1}{2} \{ \Gamma_{11} + \Gamma_{33} \pm \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{13}^2} \} \quad \begin{aligned} &1 \text{ podélný} \\ &1 \text{ příčný kmit} \end{aligned}$$

Piezoelektricky volné kmity

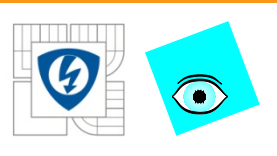


Typický výsledek



The response of PZN: 4.5%PT $\langle 111 \rangle$. The crosses sign the times of the flights t_i .

P.Hána et al.: Ferroelectrics **319** (2005) 145-154

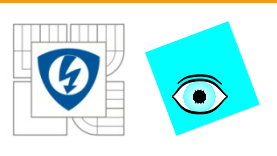


d_{33} - metr

Kvazistatické měření, jednosměrný tlak je aplikován na vzorek, je analyzován generovaný elektrický náboj ve srovnání se vzorkem se známým koeficientem d_{33}

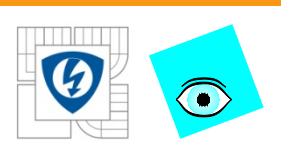
d_{33} -měření – mechanický tlak kolmý na elektrody

d_{31} -měření – mechanický tlak rovnoběžný s elektrodami



Teplotní závislosti materiálových vlastností

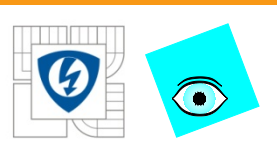
- starší analyzátor Tesla BM507 (5Hz-500kHz) + čítač HP5326B
- LCR metr HP4261A (120Hz or 1kHz, sériový nebo paralelní obvod)
- Ultrathermostat U-10 ($\pm$ několik $^{\circ}\text{C}$, pokojová teplota-80 $^{\circ}\text{C}$)
- Rezonanční měření
- pec Classic (pokojová teplota-1200 $^{\circ}\text{C}$) – měření Curieovy teploty z měření teplotní závislosti permitivity s využitím Curie-Weissova zákona



2.12.2011

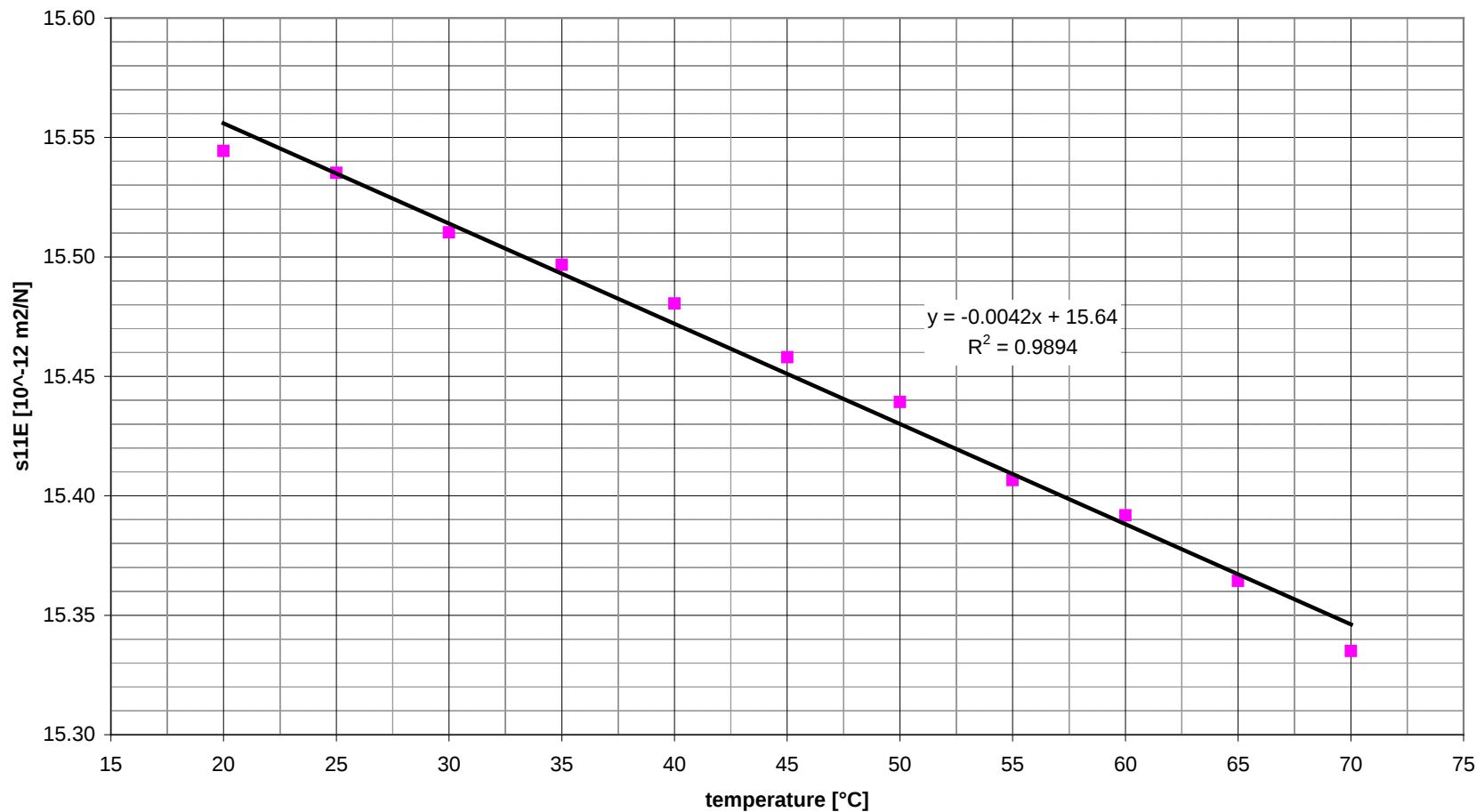
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Teplotní závislost elastické poddajnosti s_{11}

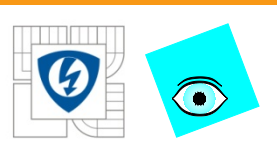
Elastic constant s_{11E} for APC850



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

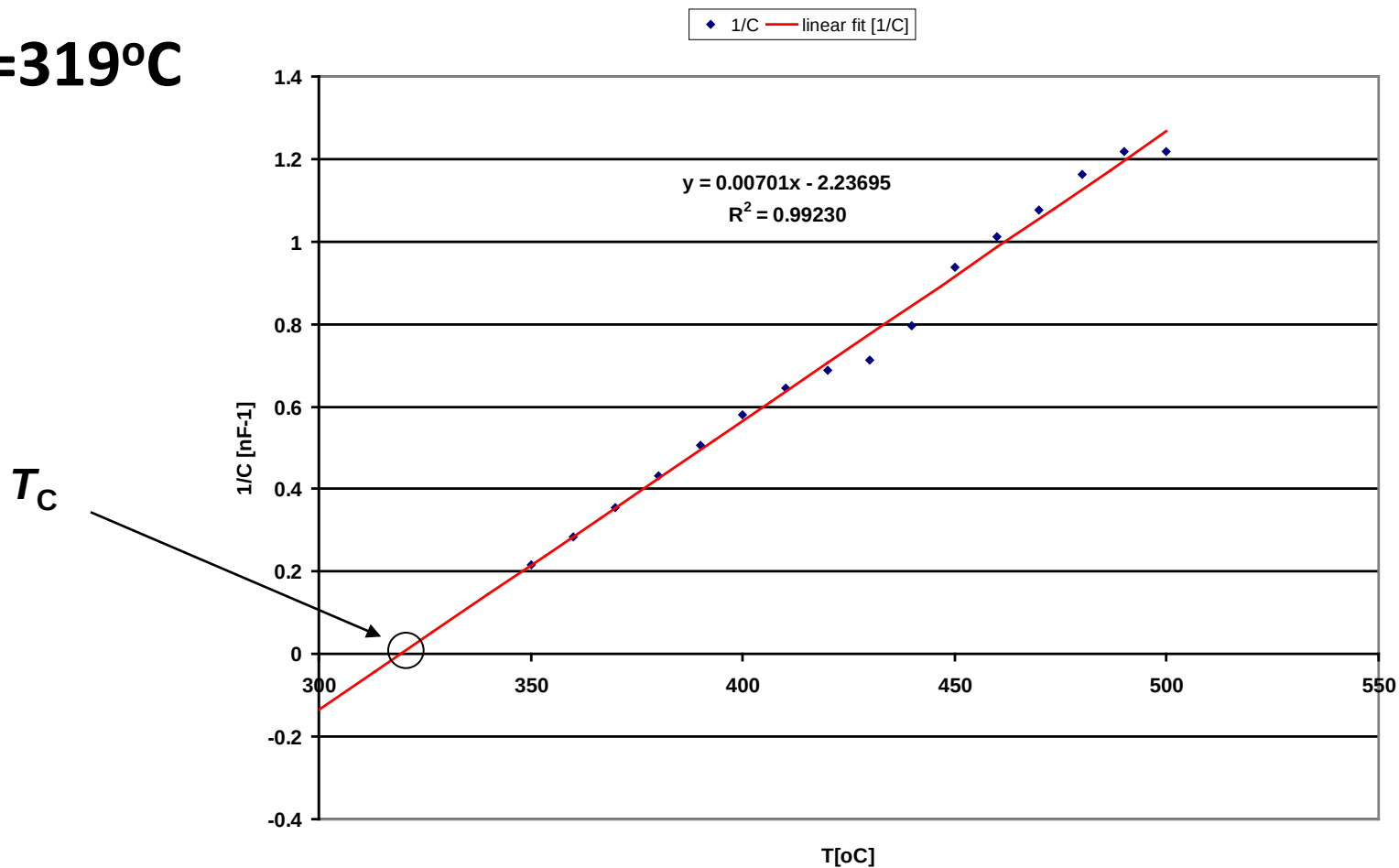


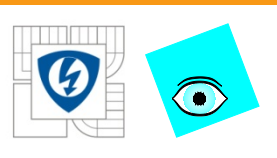


Typický výsledek – Curieova teplota

$T_C = 319^\circ\text{C}$

Temperature dependence for APC850





Piezokeramický bimorf



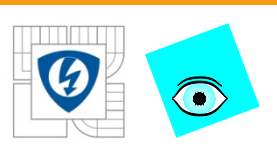
 PZT

 Kovová
deska



2.12.2011

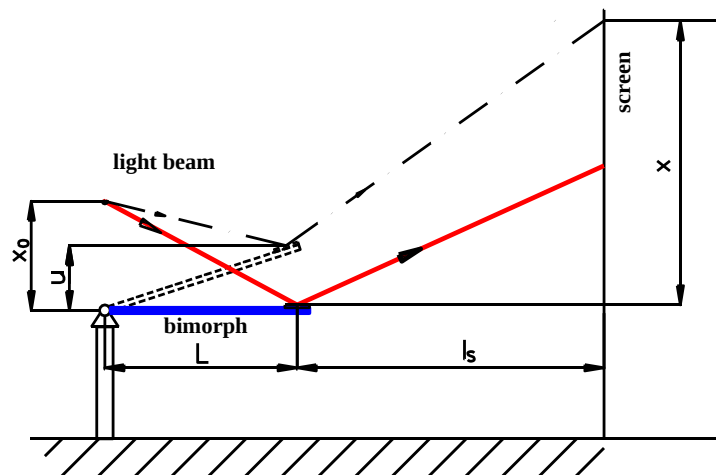
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



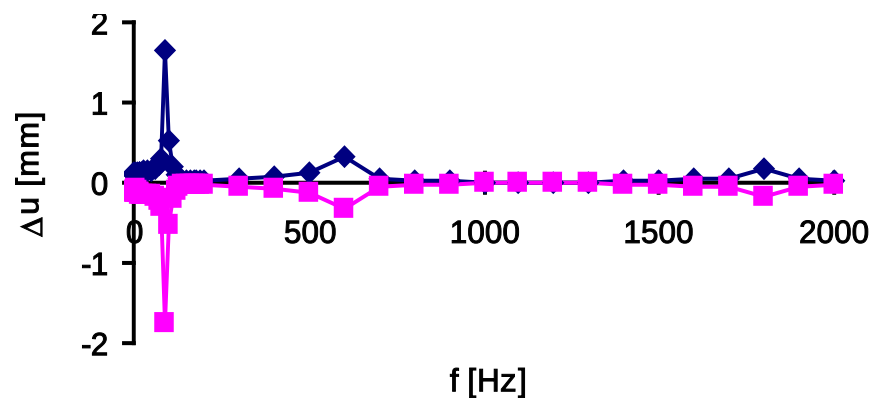
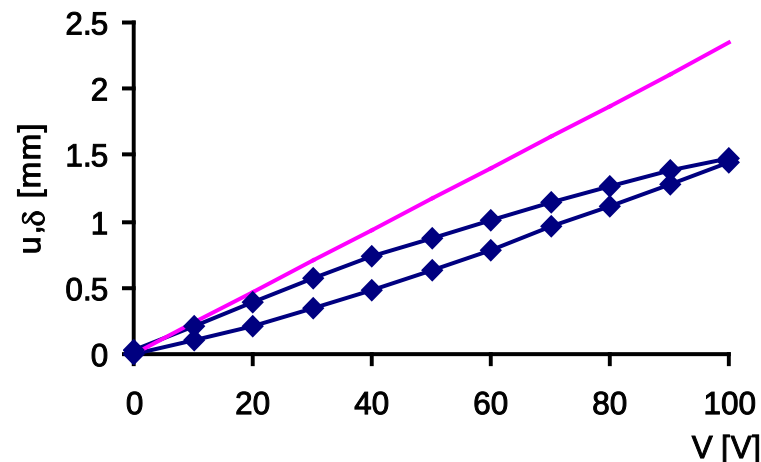
Vizualizace výchylky bimorfu

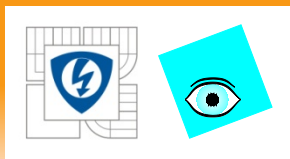
Laserový svazek

$$u \ll x, x \gg x_0, l_s \gg L$$

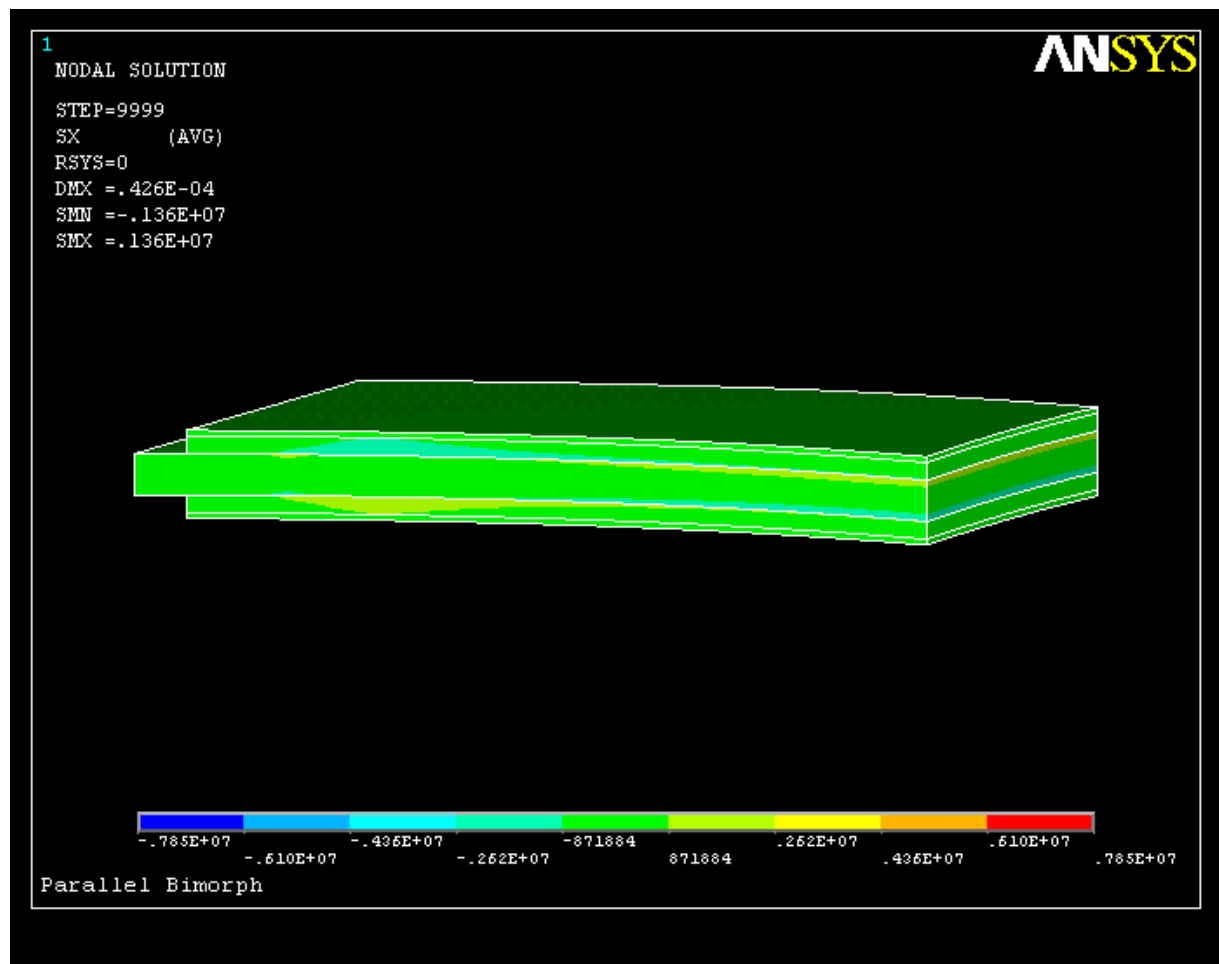


$$u \approx \frac{L^2 (x + x_0)^2 - (L + l_s)^2 x_0^2}{2x_0 \left[(L + l_s)^2 + 2x(x + x_0) \right]}$$





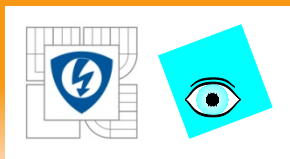
P.Pŭlpán



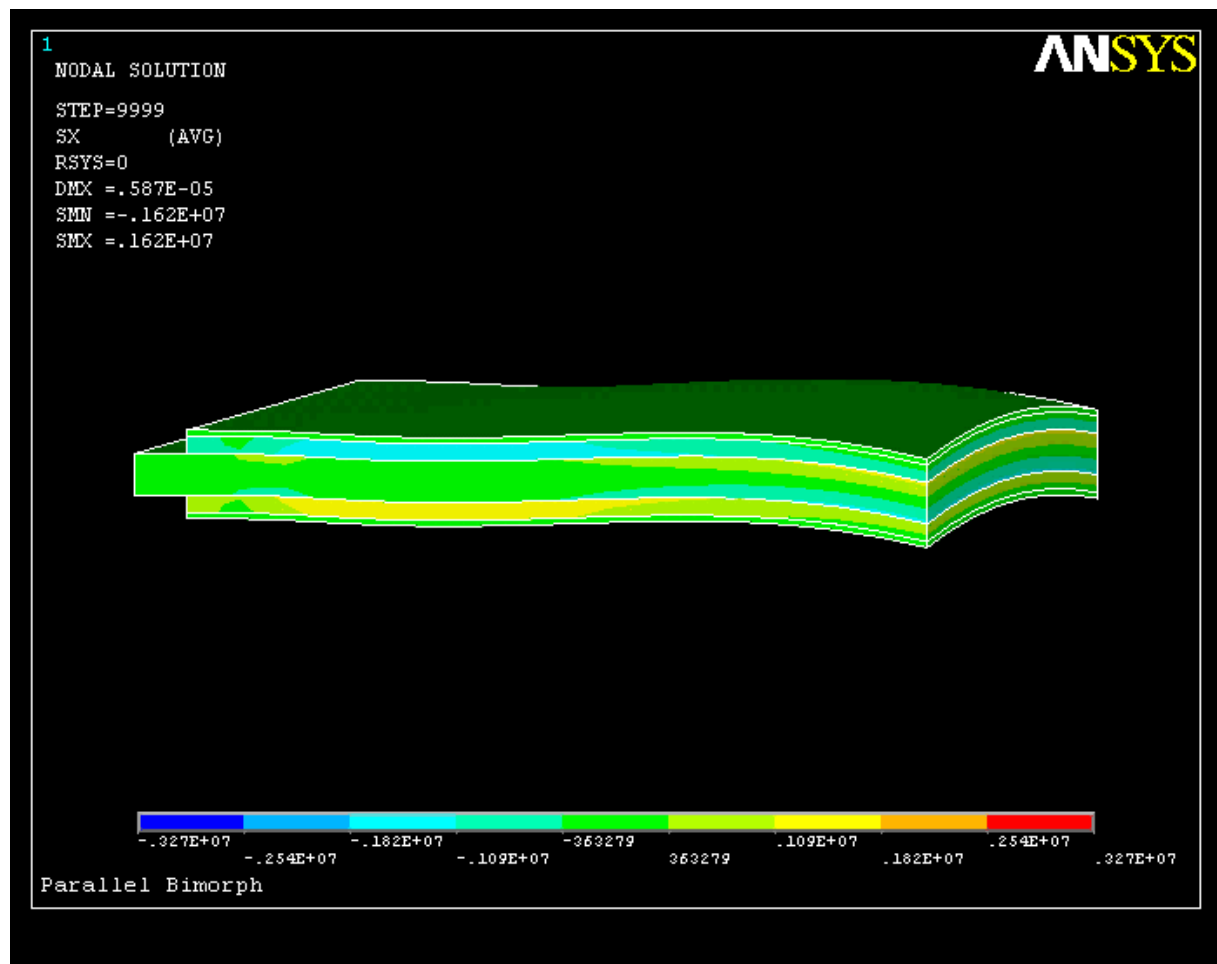
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





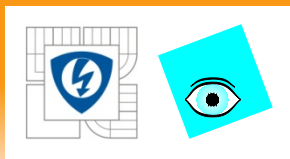
P.Pŭlpán



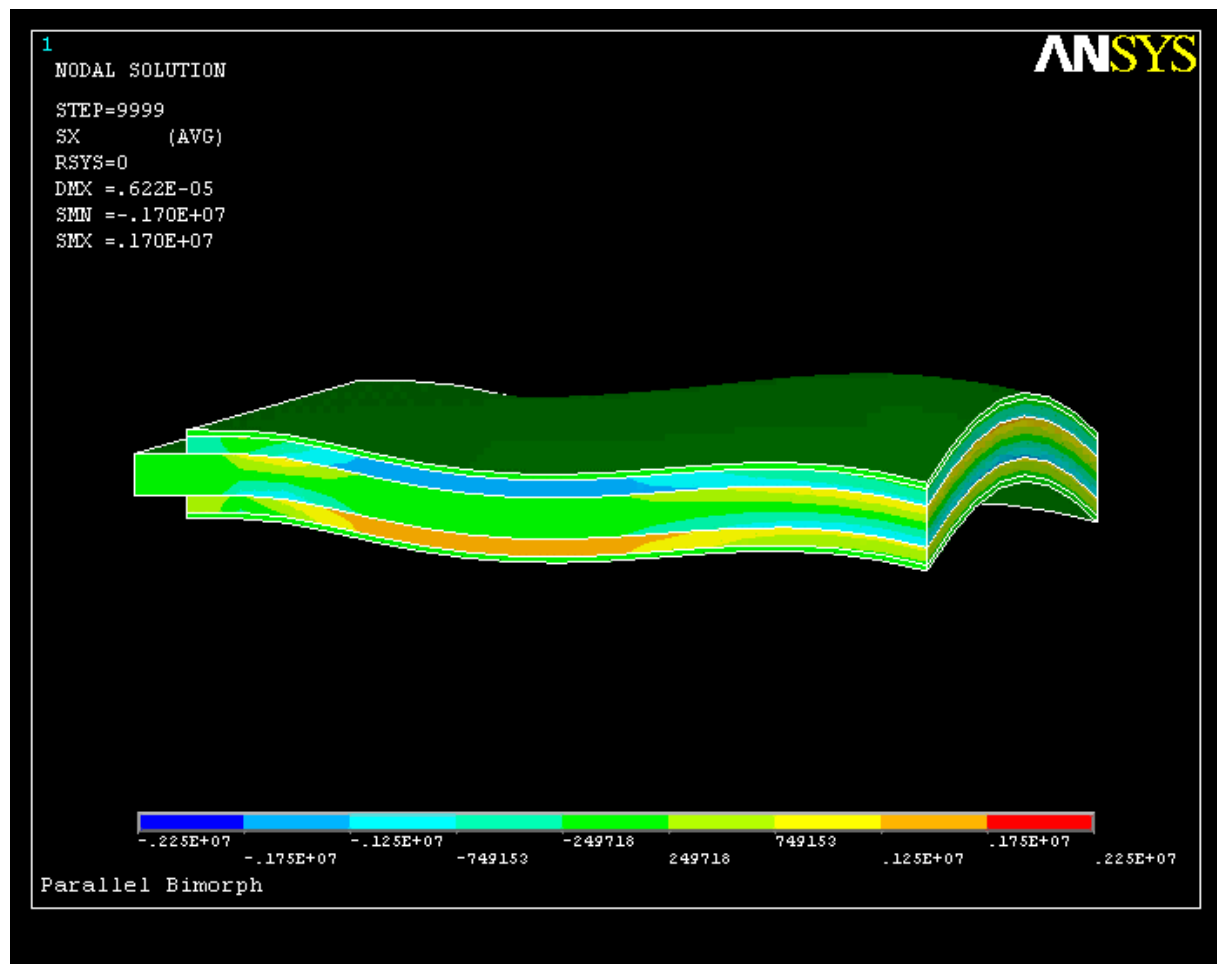
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





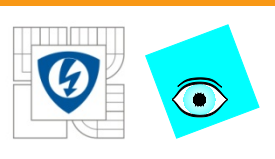
P.Půlpán



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





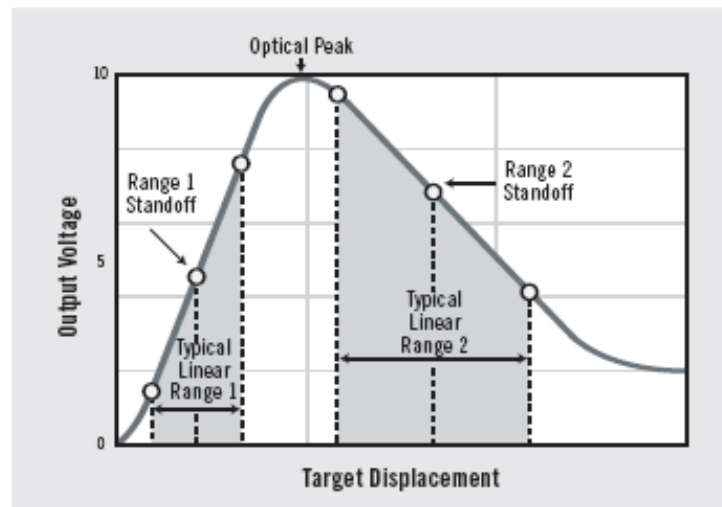
MTI2100 Fotonický senzor

Intenzita odraženého světla

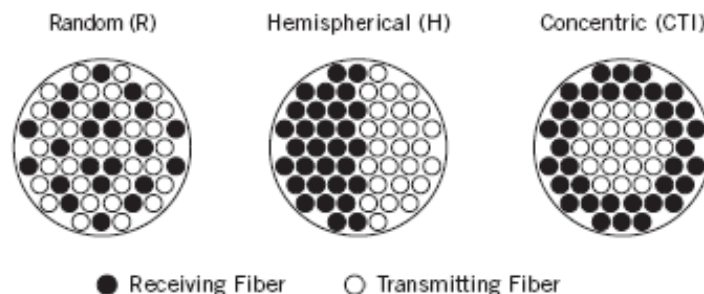
Sondy

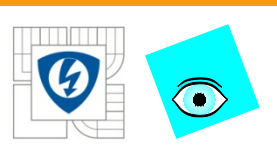
MT2062R (1-1500 μ m)

MT2125R (1-4000 μ m)



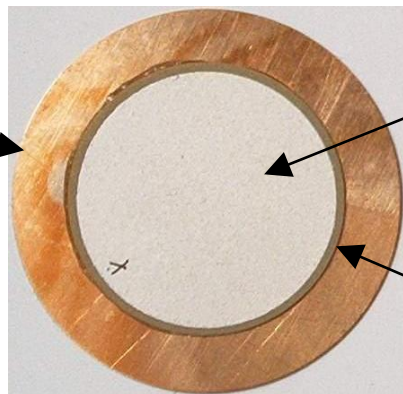
Fiber Distribution





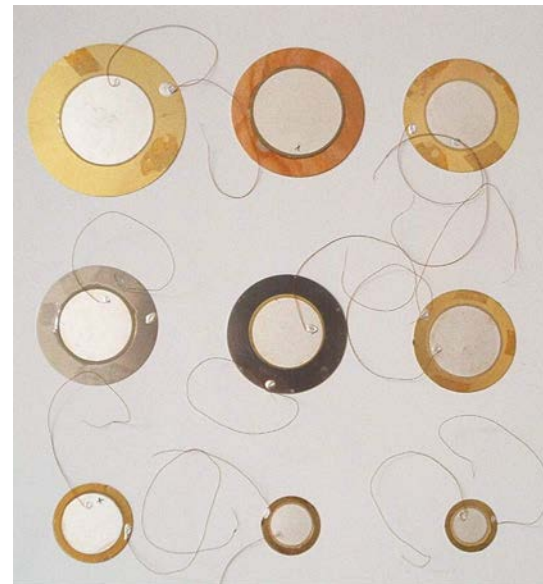
Piezokeramické unimorfy

Kovová
membrána

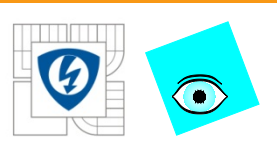


Ag
elektroda

PZT
keramika

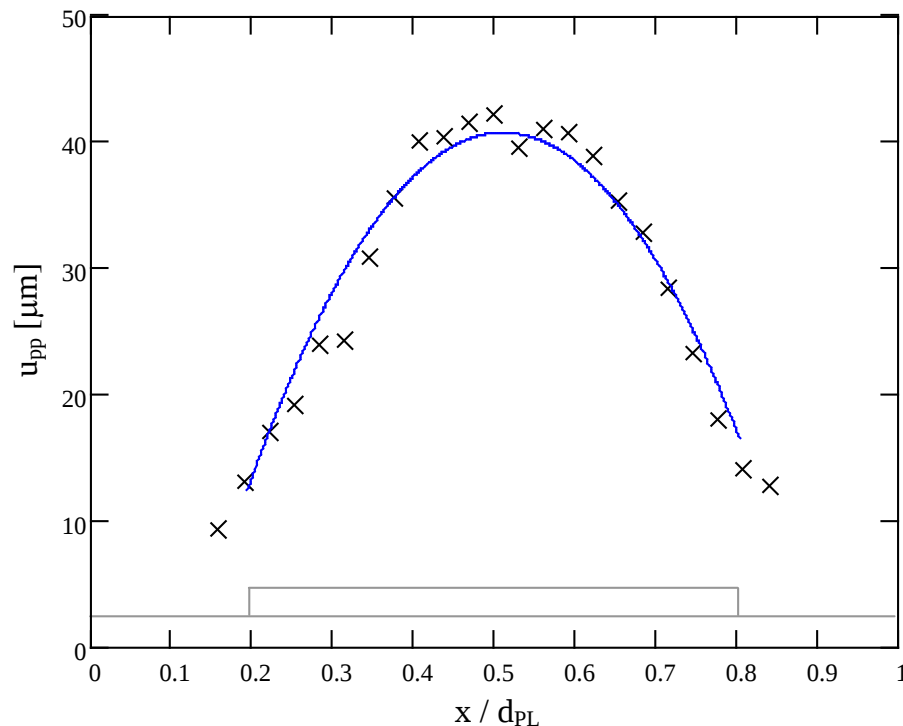


Sirénky,
s Helmholtzovým rezonátorem

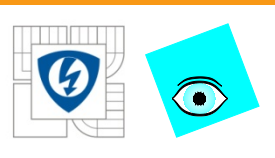


Typické výsledky

Scan povrchu unimorfu (rezonance, peak-to-peak měření)

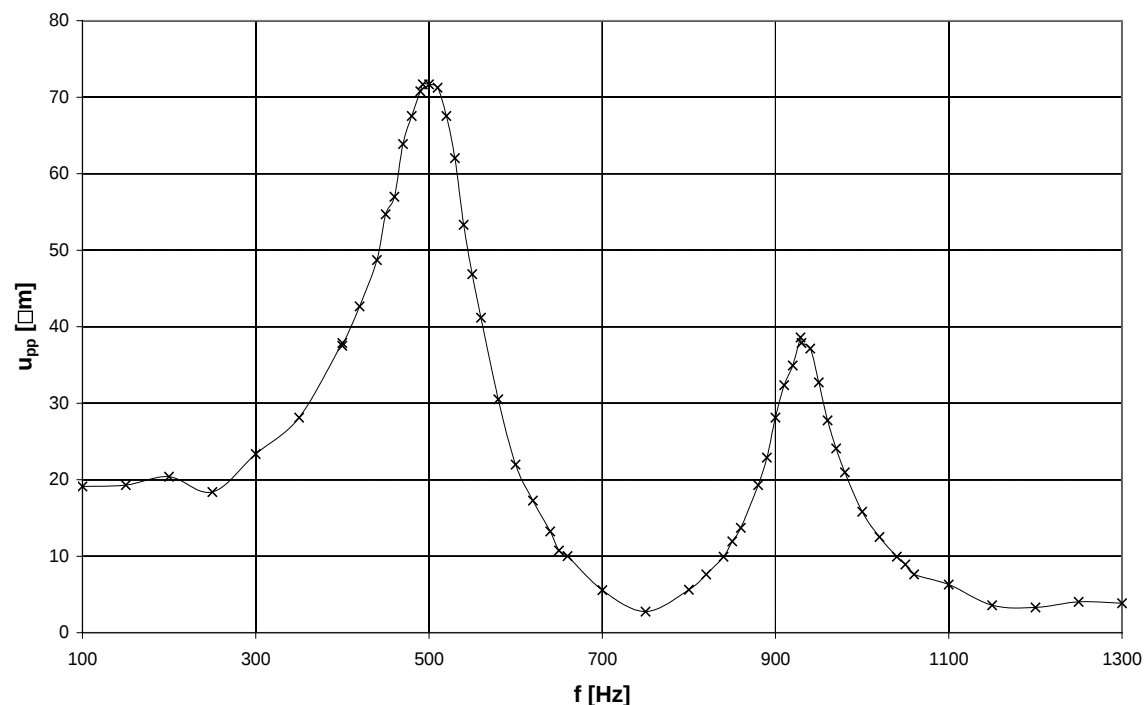
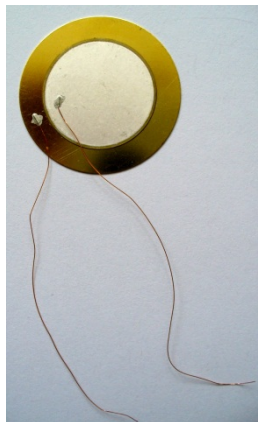


Výchylka podél směru x pro unimorf 20-1230, FT 41T, $U = 5$ V, $f = 927$ Hz; fitováno parabolickou křivkou $u_{pp} = -282.5 \cdot (x / d_{PL} - 0.512)^2 + 40.75$

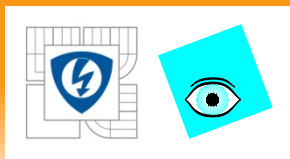


Typické výsledky

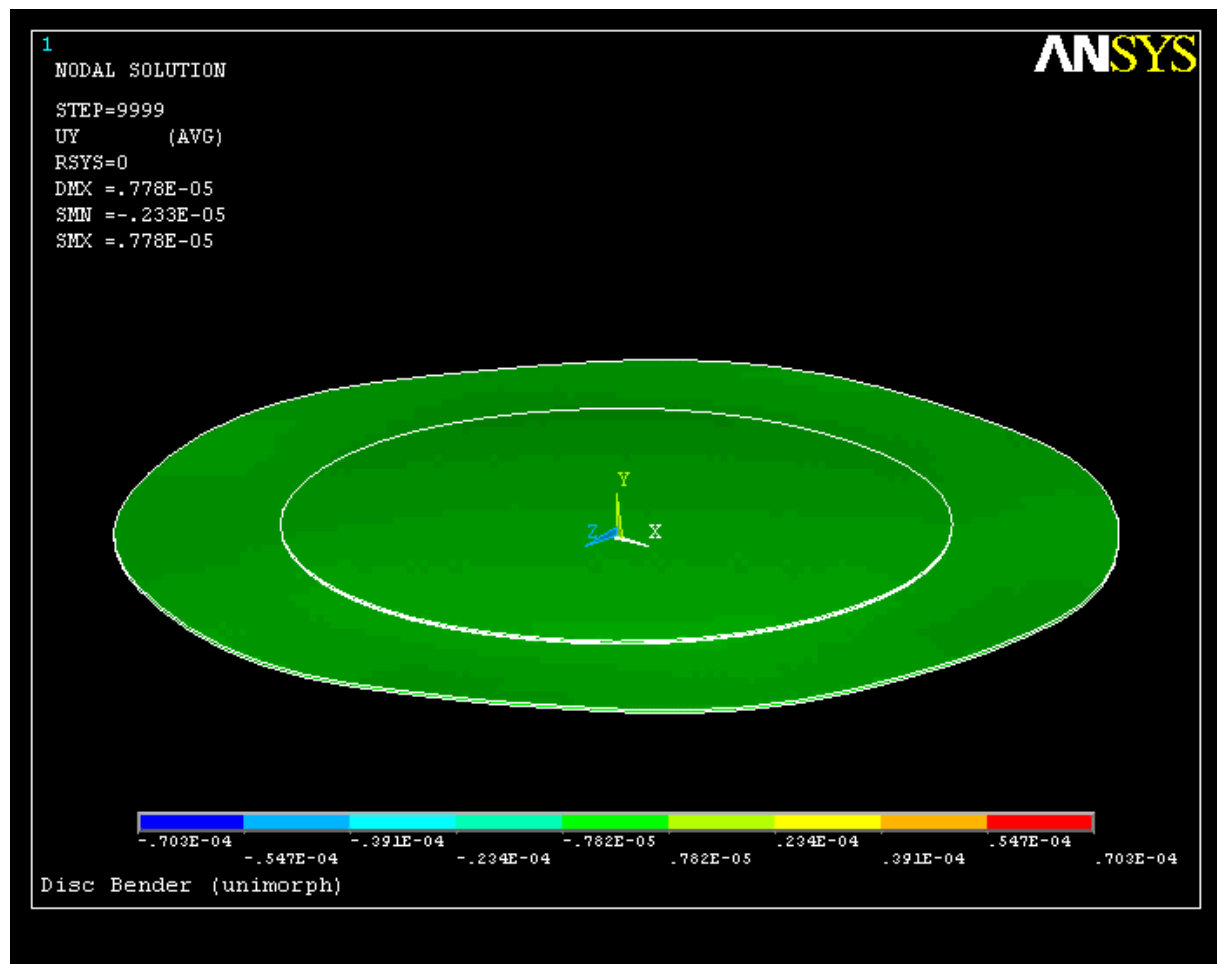
Mechanické upevnění na obvodu – výchylka ve středu unimorfu



Peak-to-peak výchylka ve středu unimorfu
20-1230, FT 41T. Amplituda napětí 5V.



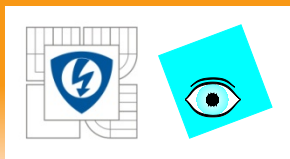
P.Půlpán



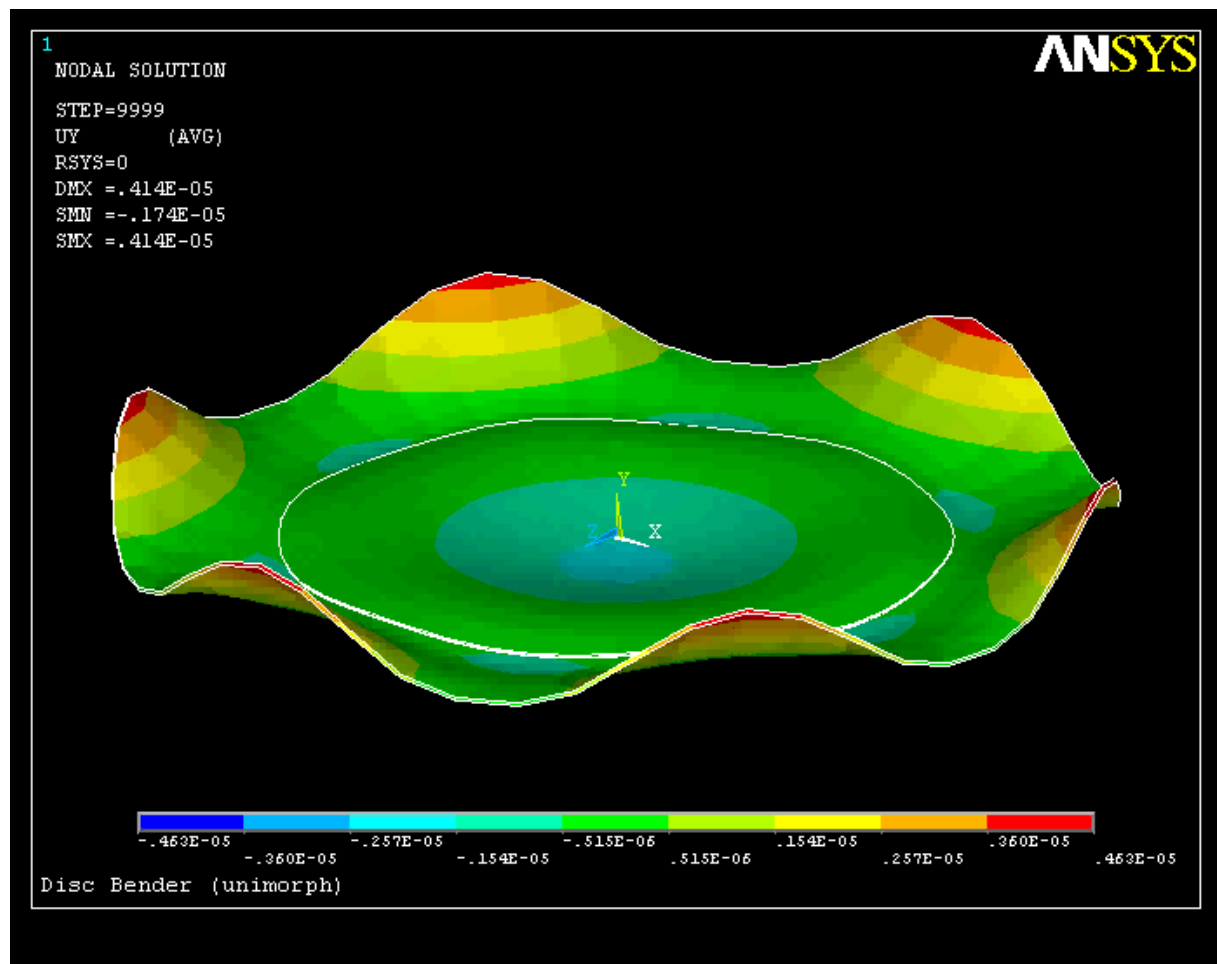
2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



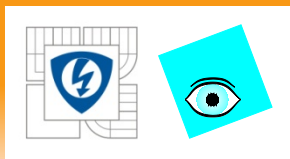


P.Pŭlpán

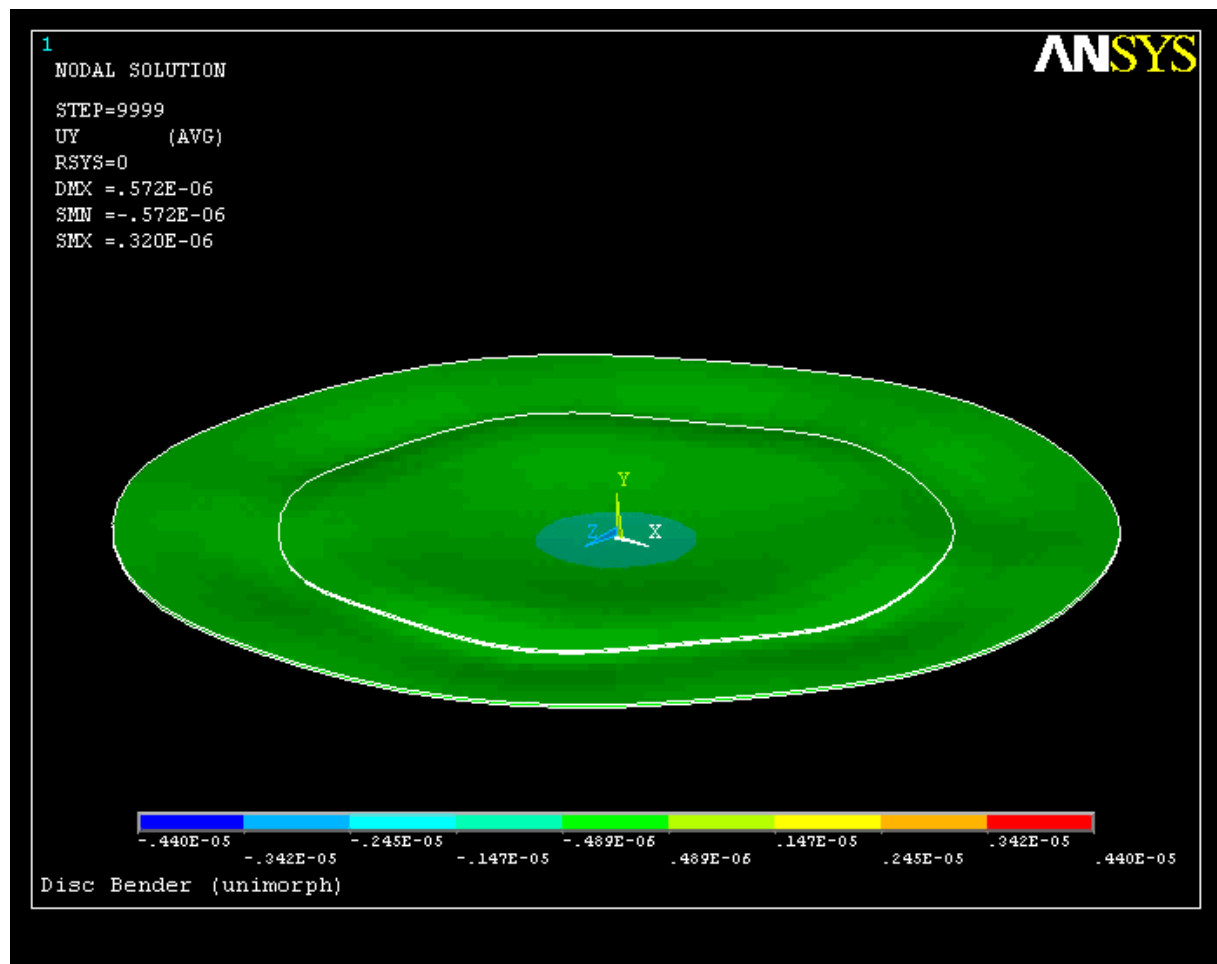


2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



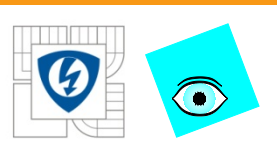
P.Pŭlpán



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

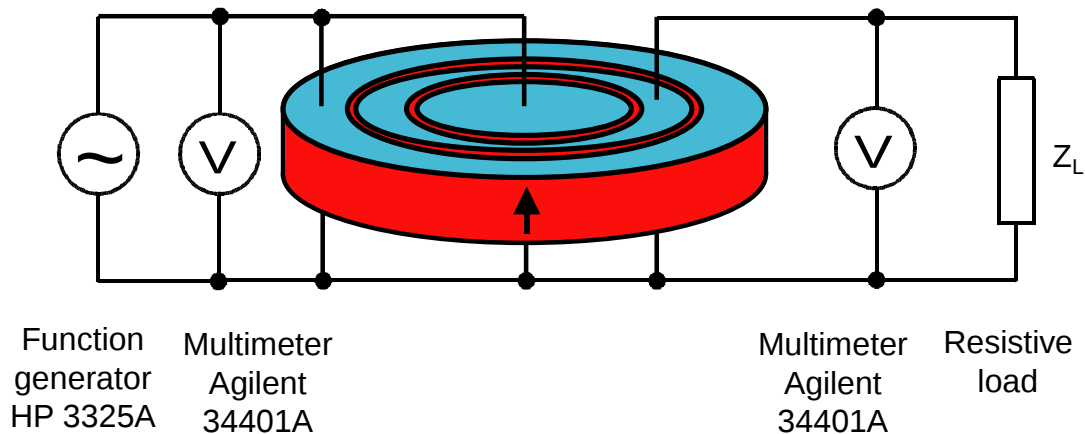


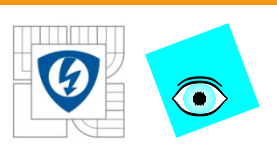


Transformační poměr – P.Půlpán

Rezistivní zátěž – dekáda Cosinus R1-1000 (1Ω - $11M\Omega$)

VOLTAGE GAIN



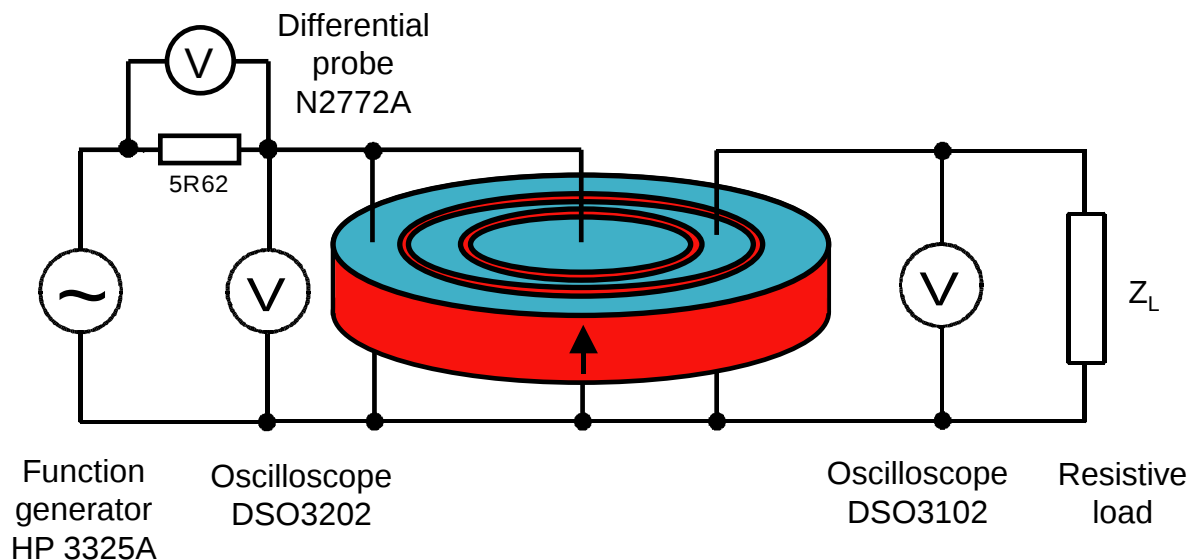


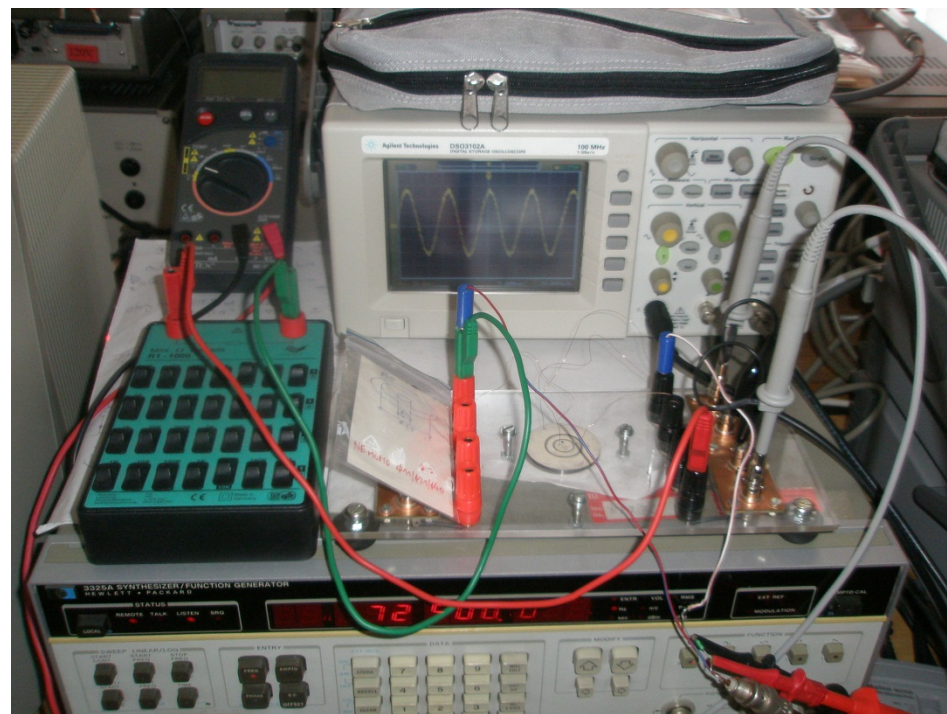
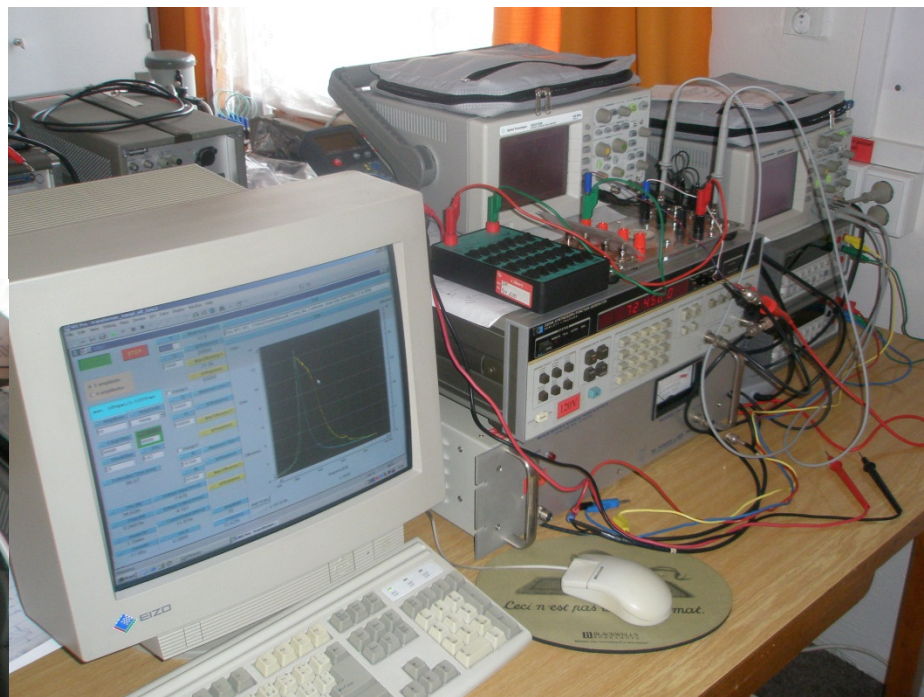
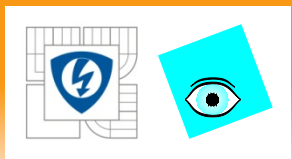
Piezelektrický transformátor

Účinnost – P.Půlpán

Rezistivní zátěž – dekáda Cosinus R1-1000 (1Ω - $11M\Omega$)

EFFICIENCY

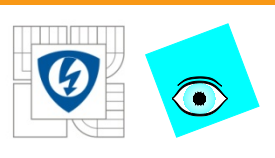




2.12.2011

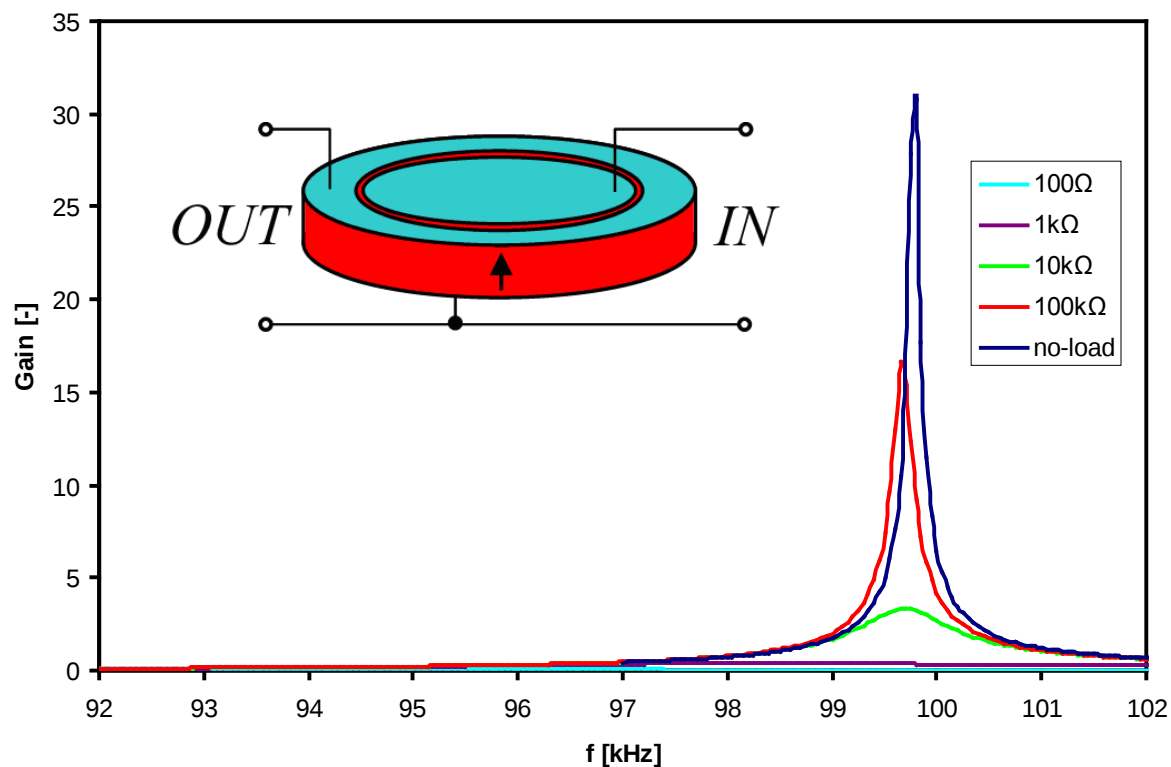
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

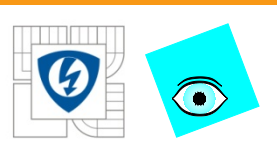




Frekvenční závislost zesílení

Ring-dot disk PT, $r_1 = 3.4 \text{ mm}$, $r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $t = 2 \text{ mm}$

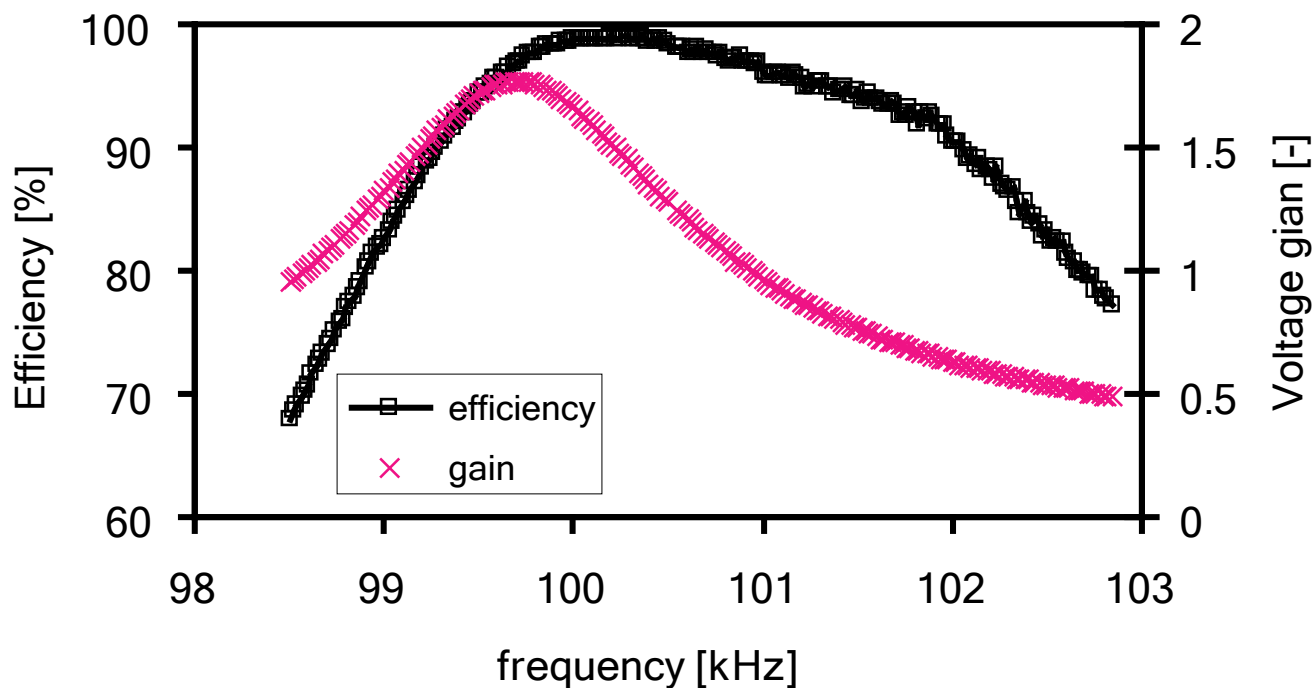


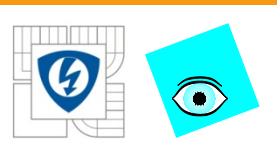


Frekvenční závislost účinnosti PT

Ring-dot disk PT, $r_1 = 3.4$ mm, $r_2 = 12.5$ mm, $t = 2$ mm

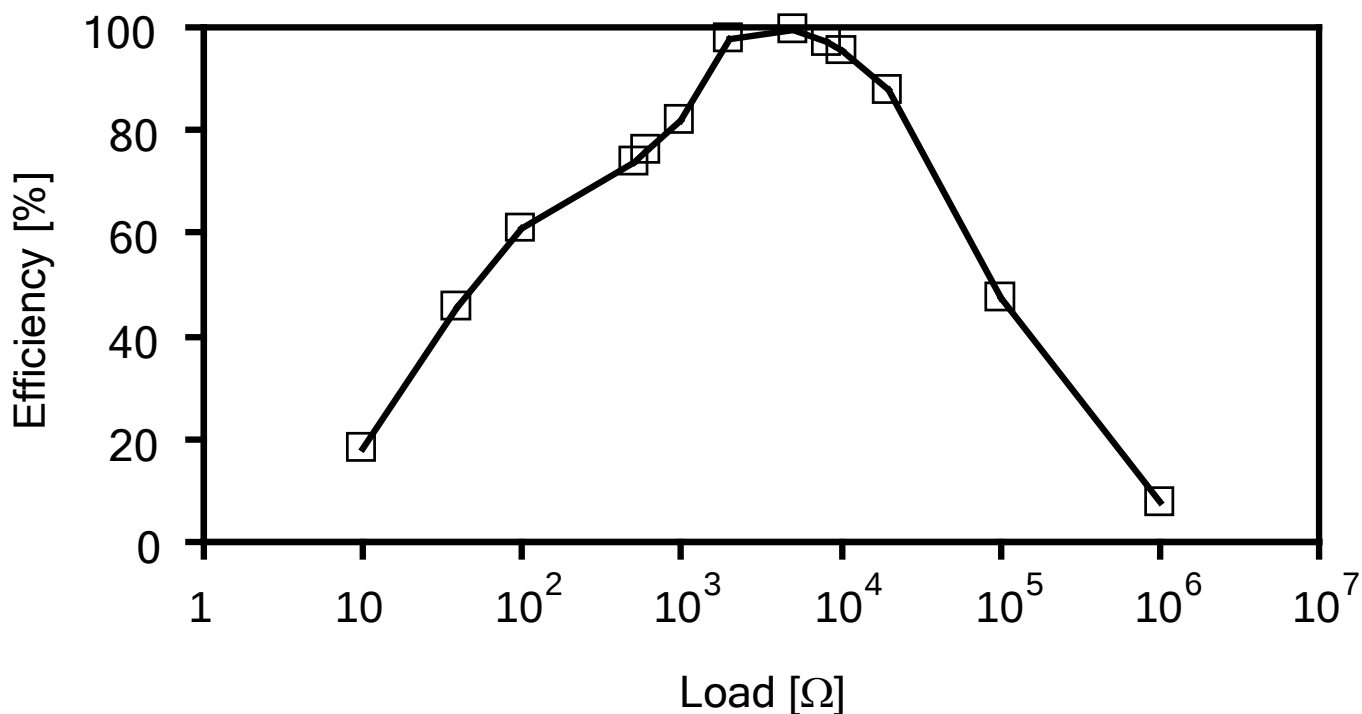
Zátěž $5\text{k}\Omega$

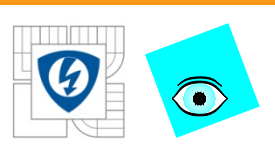




Závislost účinnosti na zátěži

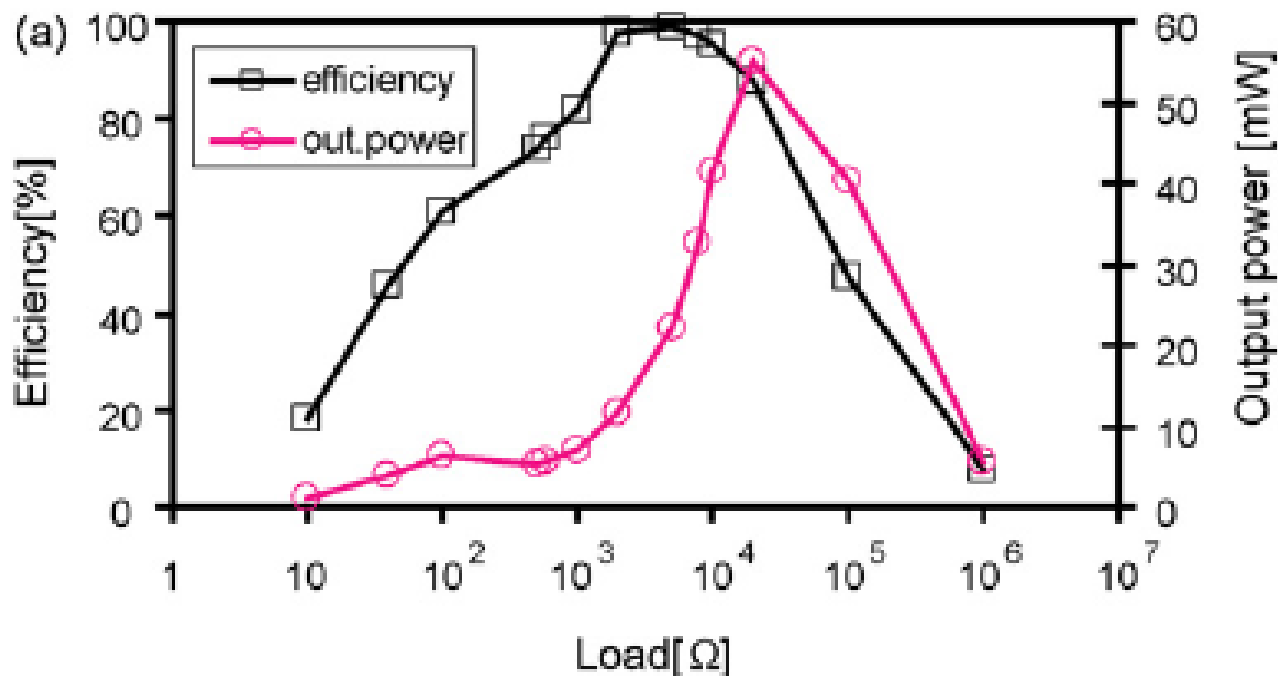
Ring-dot disc PT, $r_1 = 3.4 \text{ mm}$, $r_2 = 12.5 \text{ mm}$, $t = 2 \text{ mm}$



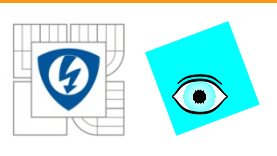


Výstupní výkon

Ring-dot PT, $r_1=3.4\text{mm}$, $r_2=12.5\text{mm}$, $t=2\text{mm}$

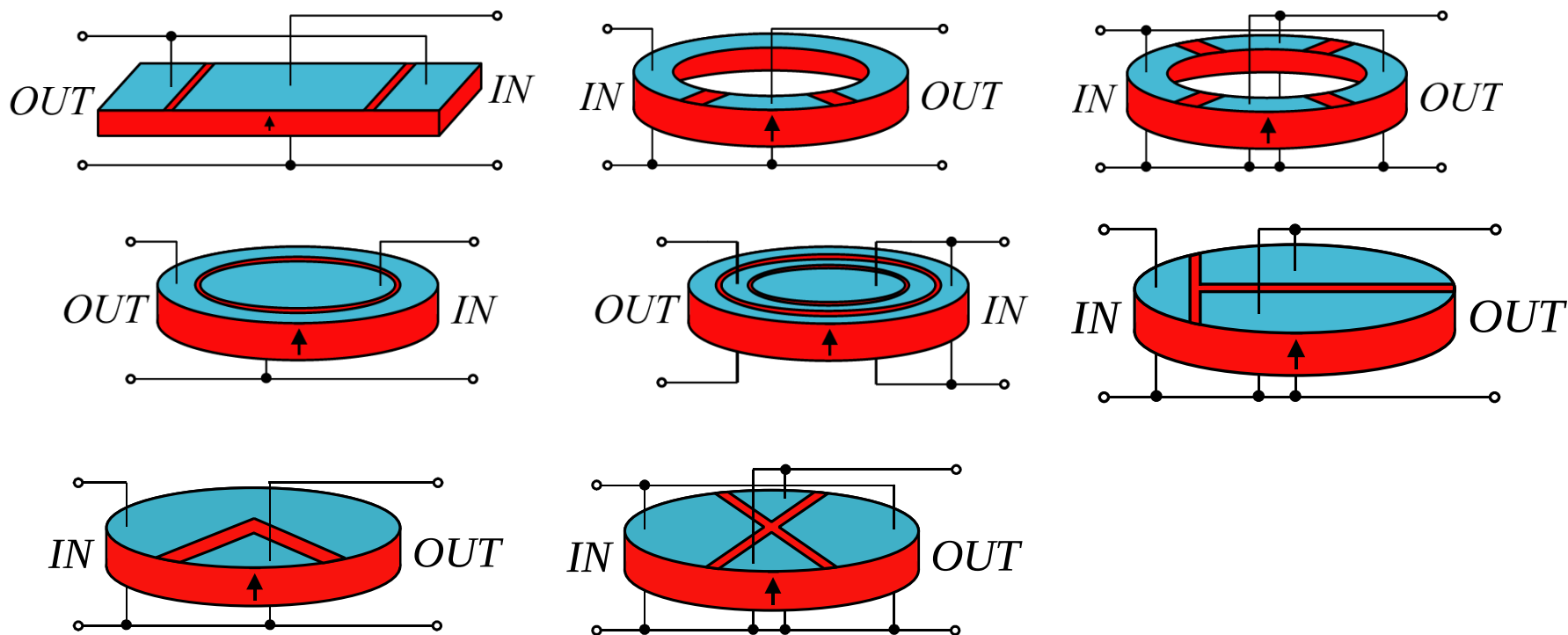


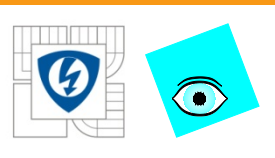
P.Půlpán, J.Erhart: Transformation ratio of “ring-dot” planar piezoelectric transformer, Sensors and Actuators **A140** (2007) 215-224



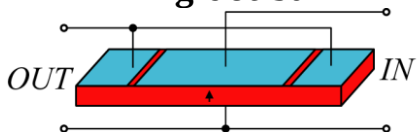
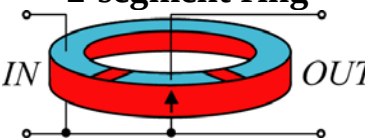
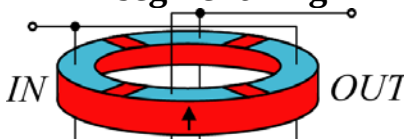
Piezelektrické transformátory

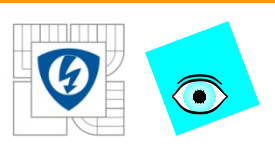
Planární mód kmitu



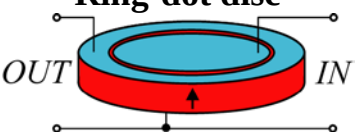
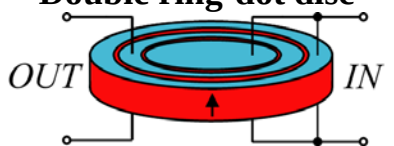
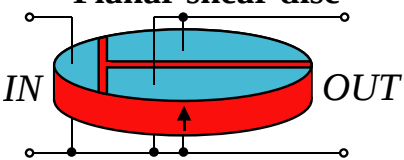


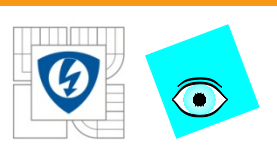
Typické hodnoty

Transformer type parameters	Step-up ratio (no load)	Step-up ratio (at max. efficiency)	Max. efficiency [%]	Load impedance (at max. efficiency) [kΩ]
Ring-dot bar  APC880 $l=17.4\text{mm}$, $w=2.4\text{mm}$, $t=1\text{mm}$	9-12	2.3	68	10
2-segment ring  APC840 $d_1=25\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$, $t=5\text{mm}$	25-33	3.6	85	20
4-segment ring  APC840 $d_1=25\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$, $t=5\text{mm}$	18-30	3.5	84	14.1



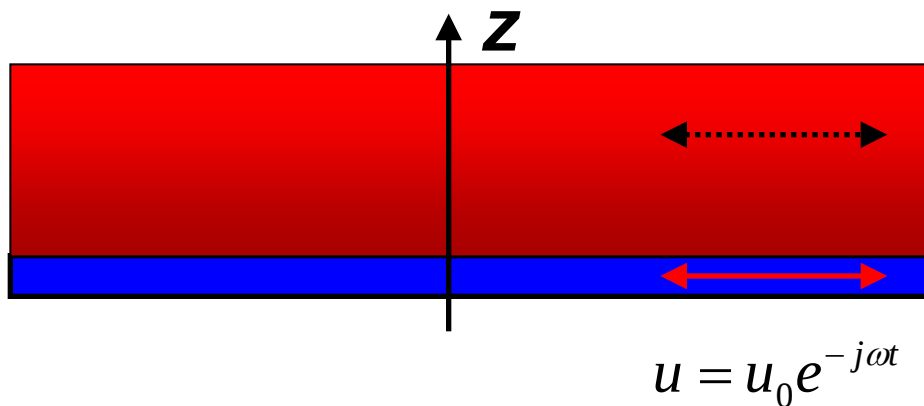
Typické výsledky

Transformer type parameters	Step-up ratio (no load)	Step-up ratio (at max. efficiency)	Max. efficiency [%]	Load impedance (at max. efficiency) [k Ω]
Ring-dot disc  APC841 $d=25\text{mm}$, $t=2\text{mm}$ $d=40\text{mm}$, $t=2.1\text{mm}$	8-30	3.4	98	5
Double ring-dot disc  APC841 $d=30\text{mm}$, $t=0.7\text{mm}$	17-20	1.9	95	2
Planar shear disc  APC841 $d=28\text{mm}$, $t=1.8\text{mm}$	4-20	1.5	87	1.3



Kmitání těles ve vazké tekutině

Kmitání polov roviny – tlumené kmity, hloubka průniku δ

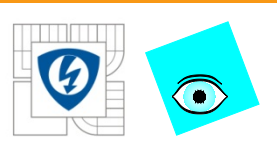


$$v = u_0 e^{-z/\delta} e^{j(z/\delta - \omega t)}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}$$

Mechanické napětí od vazkých sil – fázový posuv

$$\tau = -\sqrt{\omega\rho\eta}u_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$$



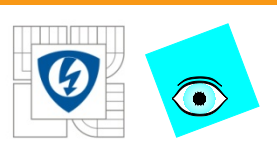
Kmitání koule ve vazké tekutině

Síla odporu vazké tekutiny proti harmonickému pohybu

$$u = u_0 e^{-j\omega t}, \quad \delta \equiv \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}}$$

$$F = 6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\delta}\right) u + 3\pi R^2 \sqrt{\frac{2\eta\rho}{\omega}} \left(1 + \frac{2R}{9\delta}\right) \frac{du}{dt}$$

Využití piezoelektrického bimorfu pro buzení kmitů i snímání odporující síly



Bimorf



Bimorf
ponořený
do kapaliny

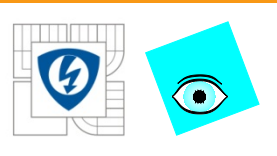


■ PZT
deska
■ deska
kov

2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Kmitání bimorfu ponořeného do kapaliny

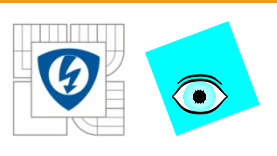
Náhrada bimorfu kmitající kuličkou v kapalině

Nucené kmity v kapalině

$$(M_e + M_i) \frac{d^2 y}{dt^2} + (b_{in} + b) \frac{dy}{dt} + Ky = F_0 e^{-j\omega t}$$

$$M_i = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho \left(1 + \frac{9\delta}{2R} \right), \quad b = \frac{6\pi\eta R^2}{\delta} \left(1 + \frac{\delta}{R} \right)$$

M_e , K a b_{in} jsou efektivní hmotnost, tuhost bimorfu a vnitřní tlumení



Rezonance bimorfu

Mechanická rezonance bimorfu je snímána elektricky na impedančním spektru (piezo)

- Volně ve vzduchu - rezonance

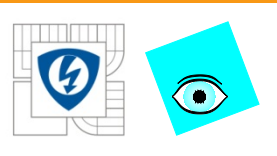
$$f_i = \frac{n_i}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e}}$$

- Tlumení v kapalině - rezonance

$$\omega_{\max}^2 = \omega_0^2 - \frac{1}{2} \gamma^2, \quad \omega_0^2 = \frac{K}{M_e + M_i}, \quad \gamma = \frac{b + b_{in}}{M_e + M_i}$$

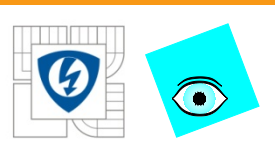
Šířka rezonanční křivky

$$\sqrt{3\gamma}$$



Princip měření pomocí bimorfu

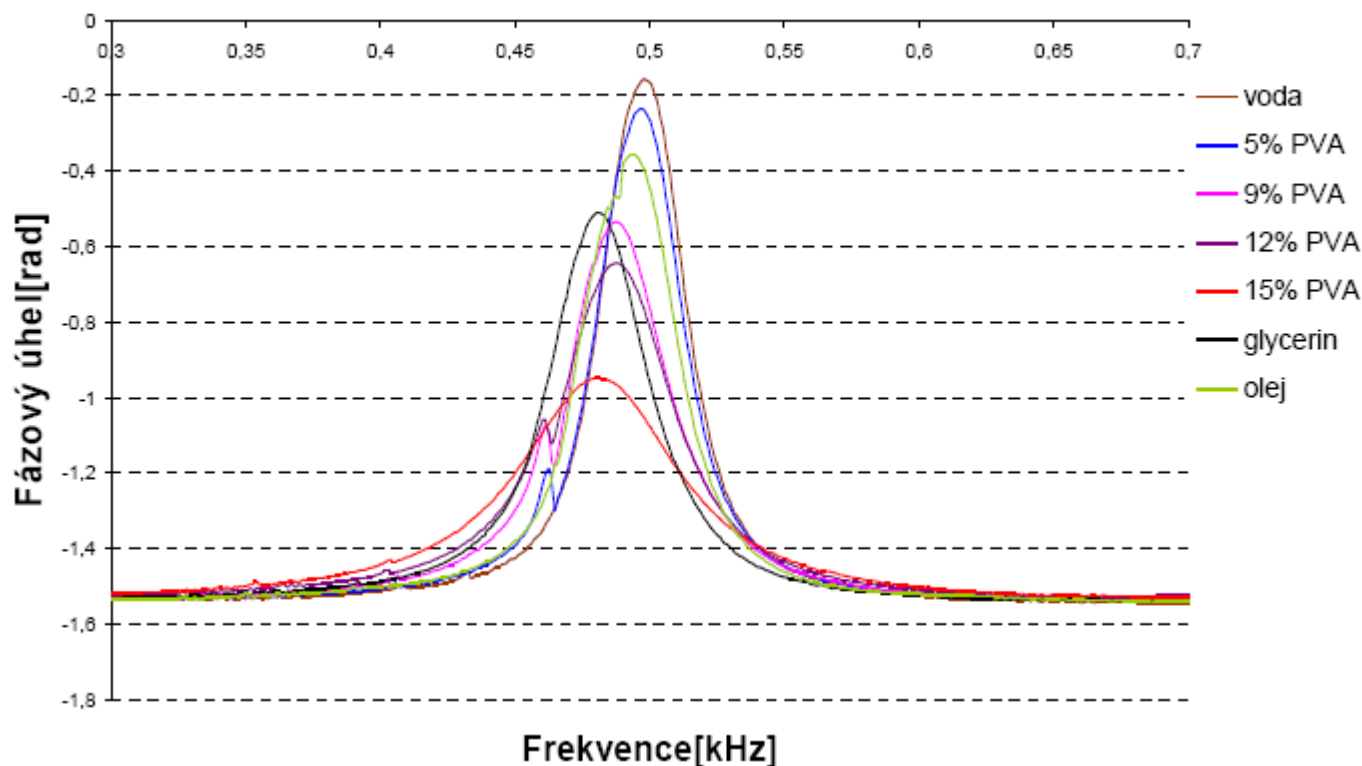
- Kalibrace na známé kapalině pro získání poloměru odpovídající kuličky
- Impedanční spektrum bimorfu kmitajícího v kapalině
 $\rightarrow \gamma, \omega_{\max}$
- Výpočet viskozity a hustoty

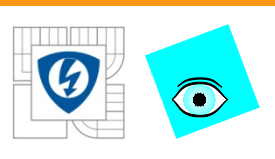


Typický výsledek

Druhá rezonanční frekvence bimorfu v kapalině

Fázový úhel vs frekvence PZT bimorfu 600-200-.60-SA





Parametry rezonance

Bimorf 600/200/0.60-SA

typ kapaliny	$f(1)$ (Hz)	$\gamma(1)/2\pi$ (Hz)	$f(2)$ (Hz)	$\gamma(2)/2\pi$ (Hz)	$n(f(2)/f(1))$
vzduch	67,7	7,88	575,44	46	8,49985229
voda	37,584	4,314	497,876	36	13,24702
5% PVA	36,03	6,951	496,731	37,724	13,7865945
9% PVA	35,755	7,394	487,665	40,529	13,6390715
12% PVA	30,2	šum	487,665	46,109	16,1478477
15% PVA	29,969	šum	482,082	71,806	16,0860222
glycerin	30,903	7,28	480,974	42	15,5639906
silikonový olej	33,625	6,825	494,43	40,805	14,7042379

Bimorf 600/200/060 SA

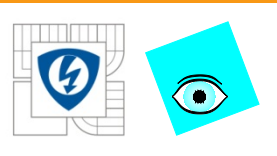
R vody=97,788 mm

typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,001
5% PVA	0,74	0,1108
9% PVA	2,07	0,1235
12% PVA	4,1335	3,5042
15% PVA	30,474	6,3669
glycerin	1,5065	1,0437
silikonový olej	0,05*	1,0878

Bimorf 600/200/060 SA

R glycerinu=96,00 mm

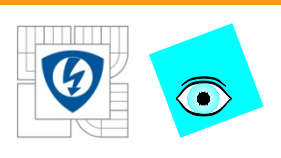
typ kapaliny	η Höpplerovým viskozimetrem (Pa·s)	η bimorfem (Pa·s)
voda	0,001*	0,0341
5% PVA	0,74	0,2474
9% PVA	2,07	0,2664
12% PVA	4,1335	4,3872
15% PVA	30,474	7,673
glycerin	1,5065	1,5003
silikonový olej	0,05*	1,5142



Další klíčové vybavení

- Lock-in zesilovač SR830 (100kHz)
- Elektrometr Keithley 6514 (V,A,Q, Ω)
- Generátory funkcí HAMEG 8150, Metrix GX1010, Motech FG503, HP3325A, METEX MXG 9810A,...
- multimetry HP34401A
- Milivoltmetr Goodwill GVT427B (2 kanály, 100Vp, 1MHz)
- Fotonický senzor MTI2100, sondy MT2062R (1.5mm), MT2125R (4mm)
- VN zdroj HP6516A (3kV), Spellman 30kV/10mA
- osciloskopy Agilent DSO3102, DSO3202
- Impedanční analyzátor Agilent 4294A
- VF bipolární zesilovače HSA4011 (150Vpp, 1A, DC-1MHz), HSA4052(300Vpp, 2A, DC-500kHz)

2.12.2011



Děkuji za pozornost!



2.12.2011

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

