



Piezoelektrina

starobylý jev, nová očekávání

Doc.Mgr.Jiří Erhart, Ph.D.
katedra fyziky
Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická
Technická univerzita v Liberci

Obsah přednášky

- Historie piezoelektřiny
- Piezoelektrické materiály
- Aplikace piezoelektrického jevu
- Nová očekávání
- Vlastní práce v oboru
- Koncepte výuky v oboru
- Závěr

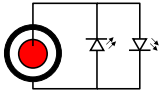
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

2

Co je to za jev?

- Kovová membrána s „něčím divným“ na povrchu
- Rozsvícení LED?



J.Erhart: Demonstrujeme piezoelektrický jev.
Matematika, fyzika, informatika 20 (2010) 106-109

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

3

Předchůdci piezoelektřiny

Pyroelektřina

turalin = lapis electricus
 $(\text{Na,Ca})(\text{Mg,Fe})_3\text{B}_3\text{Al}_6\text{Si}_6(\text{O,OH})_{31}$

Franz Ulrich Theodor Aepinus
(1724 – 1802) – polární jev

David Brewster – název pyroelektřina 1824
pyros=ohněň



Tourmaline crystal.



Carl Linnaeus
(1707 – 1778)



David Brewster
(1781 – 1868)

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

4

Pyroelektřina

A.C.Becquerel
první měření pyroelektřiny
1828



Antoine César
Becquerel
(1768 – 1878)

William Thomson (Lord Kelvin)
teorie pyroelektřiny
1878, 1893



William Thomson,
Lord Kelvin
(1824 – 1907)

$$\Delta P_S = p \cdot \Delta \theta$$

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

5

Objev piezoelektřiny

Krystal turalínu, 1880



Pierre Curie
(1859 – 1906)



Paul-Jacques
Curie
(1856 – 1941)

8.4.1880
Société minéralogique de France
24.8.1880
Académie des Sciences

$$\Delta P = d \cdot T$$

Curie J, Curie P (1880) Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémiédres à faces inclinées. Comptes rendus de l'Académie des Sciences 91: 294, 363.

Curie J, Curie P (1881) Contractions et dilatations produites par des tensions électriques dans les cristaux hémiédres à faces inclinées. Comptes rendus de l'Académie des Sciences 93: 1137-1140.

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

6

První teorie a aplikace piezoelektriny

Tenzory pro popis anisotropie krystalu 1890

Woldemar Voigt: Lehrbuch der Kristallographie, Teubner Verlag 1910



Woldemar Voigt
(1850-1919)

První aplikace – elektrometr,
radioaktivita (Maria Skłodowska-Curie)



Curie's electrometer



Maria Skłodowska-Curie
(1867-1934)

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

7

Jevy ve vázaných polích

Heckmannův diagram

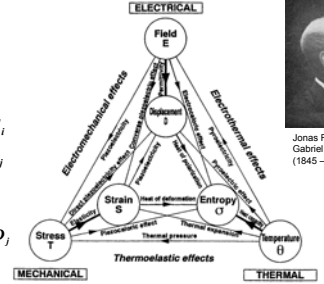
Piezoelektrina

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

$$D_i = d_{ij}^E T_{jk} + \epsilon_{ij}^T E_j$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^D T_{kl} + d_{ij}^D D_l$$

$$E_i = -d_{ij}^D T_{jk} + \beta_{ij}^T D_j$$



Jonas Ferdinand
Gabriel Lippmann
(1845-1921)

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

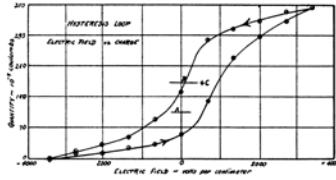
8

Feroelektřina

Joseph Valasek, 1920, Seignetteova sůl $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$



Joseph Valasek
(1897-1993)



Hysteresis loop in Rochelle salt - dried crystal at 0°C

Valasek J (1921) Piezoelectricity and allied phenomena in Rochelle salt. Phys. Rev. 17: 475-481

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

9

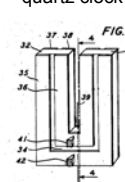
Křemen

SiO_2 – přírodní a syntetický

quartz clock



Warren Perry
Mason
(1900-1986)



Quartz crystal



W.P.Mason: US patent No. 2,081,405 (1937) – první patent na rezonátor pro hodinky

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

10

Křemenný rezonátor

W.G.Cady - první standard frekvence v US National Bureau of Standards, 1921

1926 – stabilizace frekvence radiového vysílače



Walter Guyton Cady
(1874-1974)



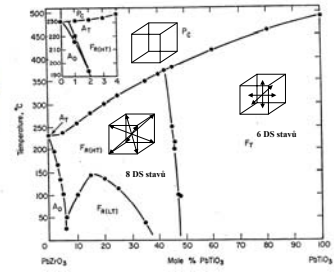
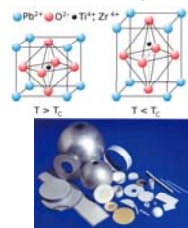
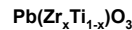
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

11

Piezoelektrická keramika

PZT keramika –



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

12

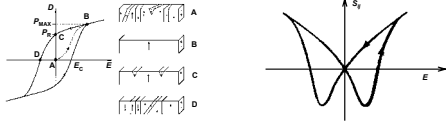
Polarizace keramiky

Před polarizací

po polarizaci



hystereze



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

13

Polarizace PZT keramiky

Elektrickým polem 2-4kV/mm, za zvýšené teploty (120-140°C)



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

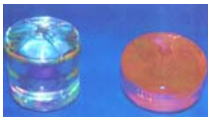
14

LiNbO₃ a LiTaO₃

Objeveny v 60. letech, syntetické krystaly
Vysoká Curieova teplota 1195°C a 610°C
Použití pro optiku a rezonátory



LiNbO₃



LiTaO₃

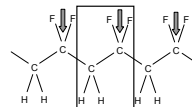
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

15

Piezelektrické polymery

PVDF (- CH₂ - CF₂ -, β-fáze),



dipole moment



Heiji Kawai (1910-7)

Eichichi Fukada (1922)

H.Kawai: The Piezoelectricity of Poly(Vinylidene Fluoride),
Jpn.J.Appl.Phys. 8 (1969) 975-976

Kopolymer P(VDF-TrFE)

Kost, kolagen, DNA,...

21.10.2010

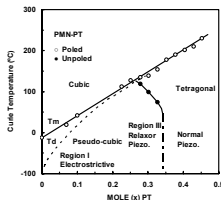
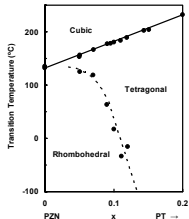
profesorská přednáška FP TUL

16

Tuhé roztoky

(1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - xPbTiO₃ (PMN-PT)

(1-x)Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃ - xPbTiO₃ (PZN-PT)



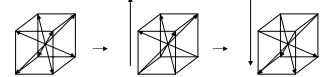
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

17

Doménové inženýrství

Řádové zvýšení piezelektrického koeficientu vhodnou polarizací krystalu



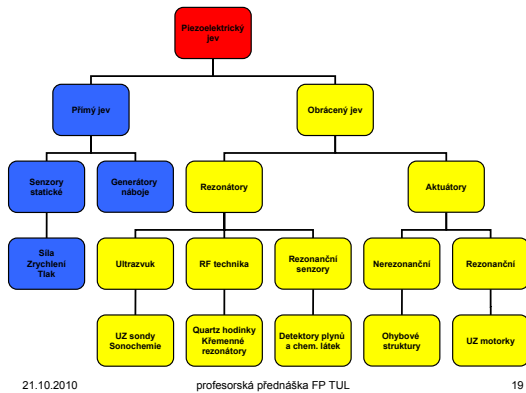
Crystal	cut	d ₃₃ [pC/N]	k ₃₁ [%]
PZN	(111)	83	38
	(001)eng	1100	85
PZN-8%PT	(111)	84	39
	(001)eng	2500	94
PMN-33%PT	(001)eng	2800	94

J.Kuwata, K.Uchino, S.Nomura: Dielectric and Piezoelectric Properties of 0.91Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.09PbTiO₃ Single Crystals, Jpn.J.Appl.Phys. 21.9 (1982), 1298-1302

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

18



Piezokeramický bimorf

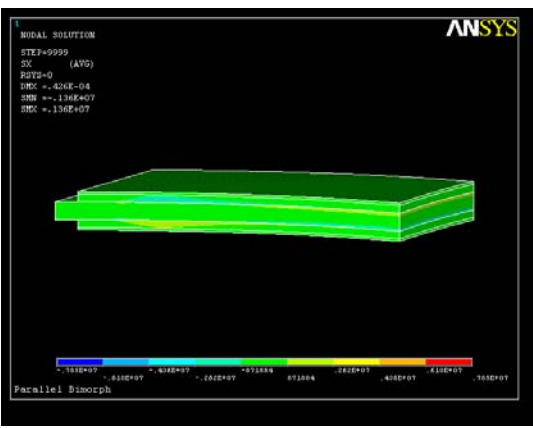


Speciální ohybové struktury

- HELMORPH® (1 Ltd.)**
- Bimorf "srotaný" do spirály
 - Velké posunutí (několik mm) a relativně velká síla (1N)

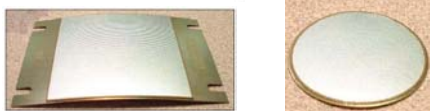


21.10.2010 profesorská přednáška FP TUL 22



Aktuátor THUNDER®

THin layer UNimorph DrivER and sensor
 Speciální technologie lepení s mechanickým předpětím
 Výchylky až 8mm a síly 100N!

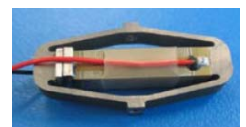


Mnohovrstvé aktuátory

Mnoho tenkých vrstev PZT keramiky
 Mnohovrstvé sektory naskládány na sebe

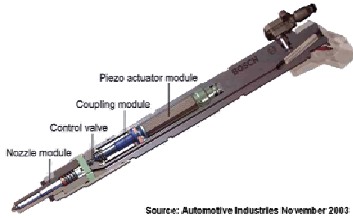


s mechanickými zesilovacími rameny



Vysoká blokovací síla (kN), malá výchylka ($\approx 1-10\mu\text{m}$) bez mechanického zesílení
 21.10.2010 profesorská přednáška FP TUL 24

Piezo-Electric Diesel Injector



Source: Automotive Industries November 2003

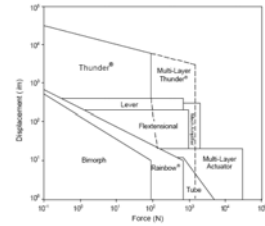
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

25

Možnosti piezoelektrických aktuátorů

Menší výchylka – vyšší blokovácí síla



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

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

26

Generace a aplikace ultrazvuku

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



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

27

Ultrazvukový motor

- Tření mezi rotorem a statorem
- Povrch statoru se pohybuje díky běžící ultrazvukové vlně



Paul Langevin (1872-1946)

Langevinův měnič sonar

rotor

stator

PZT keramika



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

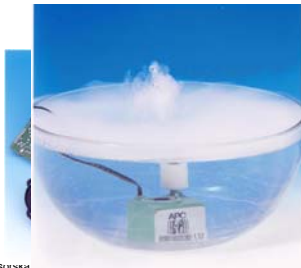
28

Atomizace kapalin

- Ultrazvukové zvlhčovače
- Inhalátory léků



21.10.2010

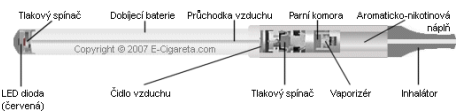


profesorská přednáška FP TUL

29

Elektronická cigareta

Atomizér uvnitř cigarety



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

30

Nová očekávání

- Nové lepší materiály (bezolovnaté, vyšší výkony, nonlinearity)
- Vyšší piezoelektrické vlastnosti (citlivější senzory, ...)
- Aktuátory s větším rozsahem posunutí vs. síla
- Miniaturizace piezoelektrických struktur a jejich integrace s polovodičovou technologií (MEMS) – tenké vrstvy
- Pokles ceny u mnohvrstevných piezoelektrických struktur – materiál elektrod

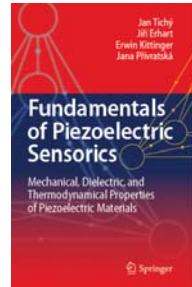
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

31

Vlastní dílo

- Feroelektrické domény – symetrie, doménové inženýrství
- Materiálové vlastnosti mnohadoménového krystalu
- Piezoelektrické transformátory a rezonátory (teplotní závislost)
- Aktuátory (bimorfy, unimorfy)
- Aplikace piezoelektrických prvků
- Vibration a tlumení piezoelektrického prvku
- Didaktické aktivity v propagaci piezoelektřiny



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

32

Tabulky doménových stěn

J. Erhart: Domain wall orientations in ferroelastics and ferroelectrics, Phase Transitions 77 (2004) 989-1074

TABLE XV Spontaneous strains and polarization vectors for all domain states in tetragonal to monoclinic species

Species		$R2m \rightarrow m_x$	
Strains	Polarization	Symmetry operation	
1	$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{11} & -S_{13} \\ -S_{13} & -S_{13} & S_{33} \end{pmatrix}$	$(P_x, -P_x, P_x)$	1
2	$\begin{pmatrix} S_{11} & -S_{12} & S_{13} \\ -S_{12} & S_{11} & S_{13} \\ -S_{13} & S_{13} & S_{33} \end{pmatrix}$	$(-P_x, -P_x, -P_x)$	$\bar{4}_x$
3	$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & -S_{13} \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} \\ -S_{13} & S_{13} & S_{33} \end{pmatrix}$	$(-P_x, P_x, P_x)$	2
4	$\begin{pmatrix} S_{11} & -S_{12} & -S_{13} \\ -S_{12} & S_{11} & -S_{13} \\ -S_{13} & -S_{13} & S_{33} \end{pmatrix}$	$(P_x, P_x, -P_x)$	$\bar{4}_x$

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

33

Tabulky doménových stěn

J. Erhart: Domain wall orientations in ferroelastics and ferroelectrics, Phase Transitions 77 (2004) 989-1074

TABLE XV (a) Domain wall orientations for species $\bar{4}2m \rightarrow m_x$

S	P	1	2	3	4
1	1	N/A	$(010)^N$ $(10a)^C$	$(001)^N$ $(110)^C$	$(100)^N$ $(01a)^C$
2	2		N/A	$(100)^N$ $(01a)^C$	$(001)^N$ $(110)^C$
3	3			N/A	$(010)^N$ $(10a)^C$
4	4				N/A

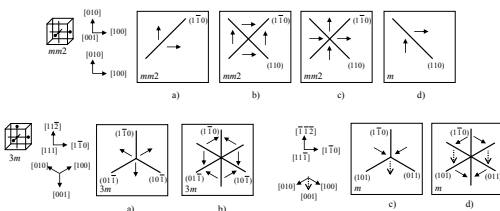
$a = \frac{S_{11}}{S_{12}}$

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

34

Symetrie mnohadoménových krystalů



J. Erhart, W. Cao: Permissible symmetries of multi-domain configurations in perovskite ferroelectric crystals, J. Appl. Phys. 94(2003) 3436-3445

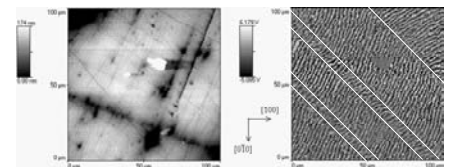
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

35

Doménové struktury

Piezoelectric mode SFM scan on PZN-8%PT (001) crystal. Added white diagonal lines correspond to the preferred orientation of the ferroelastic (110) domain walls. Topography (left) and normal piezoelectric response (right) is displayed.



M. Abplanalp, D. Barošová, P. Bridenbaugh, J. Erhart, J. Fousek, P. Günter, J. Nosek, M. Šulc: Ferroelectric Domain Structures in PZN-8%PT Single Crystals Studied by Scanning Force Microscopy, Solid State Communications 119 (2001) 7-12

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

36

Doménové inženýrství pro tyčinkový rezonátor

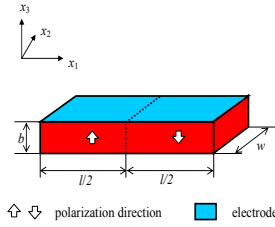
$N=1,2,3,4,5$ segmentů

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

Rezonance

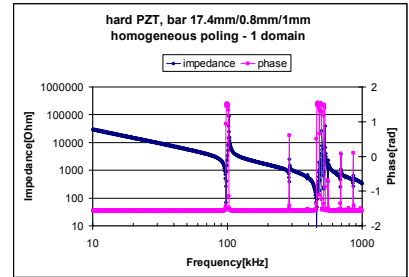
$$\frac{1}{2N}kl = \frac{\pi}{2}$$

$$\eta_n = k, l = \pi / \sqrt{\rho b_1^k}$$

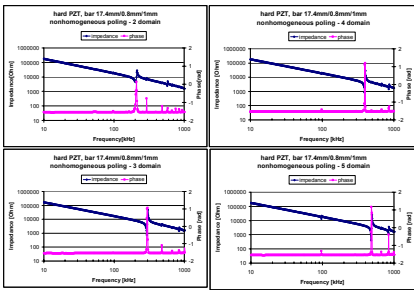


J.Erhart, M.Franclíková, L.Rusin: Piezoelectric resonators with engineered domain structures, Ferroelectrics 376, 1 (2008) 99-115

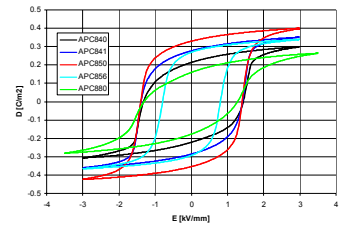
Homogenně polarizovaná tyčinka



Nehomogenně polarizované tyčinky



Hysterezní smyčky

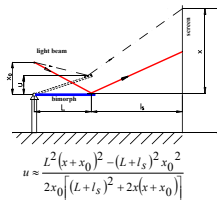


P.Půlpán, L.Rusin, J.Erhart: Influence of poling conditions on material properties of lead zirconate-lead titanate ceramics, Japanese Journal of Applied Physics 47, 10 (2008) 7953-7958

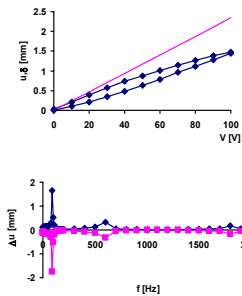
Vizualizace ohybu bimorfů

P.Půlpán, J.Erhart: Parametry piezoelektrických bimorfů, Elektro 3 (2002) 4-7

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

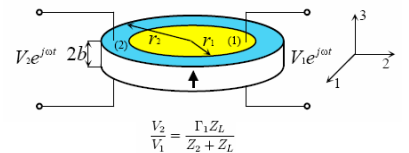


$$u \approx \frac{l^2(x+x_0)^2 - (L+l_s)^2 x_0^2}{2x_0[(L+l_s)^2 + 2x(x+x_0)]}$$



Piezoelektrický transformátor typu „Ring-dot“

Tenký keramický disk

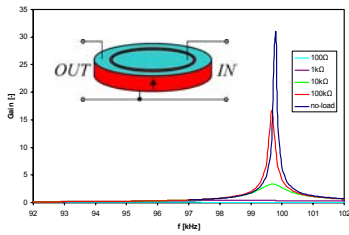


$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\Gamma_1 Z_L}{Z_2 + Z_L}$$

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

Frekvenční závislost zesílení

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



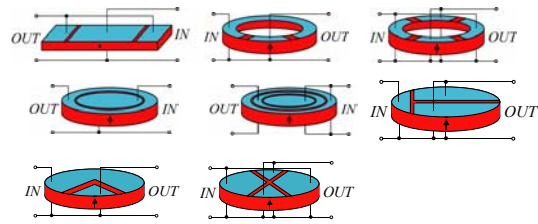
21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

43

Studované typy transformátorů

Planární módy kmitů



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

44

Koncepce výuky v oboru

- Odborné znalosti (krystalografie, tenzory, mechanika kontinua anizotropních látek, termodynamika, elektrotechnika, experimentální techniky)
- Aplikace piezoelektřiny (testování vlastností materiálů, prvky)
- Interdisciplinární aplikace
- Poctivost a náročnost
- Dosahovat znalosti na úrovni „umět aplikovat“

21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

45

Závěr

Piezoelektřina je interdisciplinární obor, vhodný pro celoživotní výzkumy!



21.10.2010

profesorská přednáška FP TUL

46