

# PIEZOELEKTRICKÝ AKTUÁTOR NA BÁZI RELAXORŮ PZN-PT (PIEZOELECTRIC RELAXOR PZN-PT BASED ACTUATOR)

Martin PUSTKA, Jaroslav NOSEK

Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Technická univerzita v Liberci, Hálkova 6, 461 17 Liberec, E-mail: martin.pustka@vslib.cz, jaroslav.nosek@vslib.cz

## SUMMARY

In the paper we study material properties of modern relaxor-based single crystals, which are important for the application in piezoelectric actuators and sensors. The research is limited to the representative system of  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{-PbTiO}_3$  (PZN-PT). The crystal and domain structure is described and the difference between [001] and [111] poled and orientated crystals is mentioned. For the orientation along [111] direction, the strain is followed by depolarization, domain reorientation and strain saturation. The piezoelectric properties are poor. In contrast, [001] orientation is stable, it exhibits very large electromechanical coefficients and the strain is hysteresis-free.

On a bar sample PZN-9%PT there are performed selected measurements using dynamic and static methods. There are determined parameters of the equivalent electric circuit and several coefficients like electromechanical coupling  $k_{33}$ , elastic coefficient  $s_{33}^D$  and piezoelectric coefficient  $d_{33}$ . The Michelson interferometer is used to study the behavior of the strain versus the electric field intensity.

The design of a simple PZN-PT multilayer actuator is described. The piezoelectric actuator stabilizes the optical path of the interferometer. Presented project exhibits very low driving voltage followed by a high strain. The feedback of an optical system is simplified.

In the final part discussion about methods used for determination of the electromechanical coupling coefficient  $k_{33}$  is presented.

**Keywords:** piezoelectric, ferroelectric, single crystal, relaxor, actuator, multilayer, interferometer

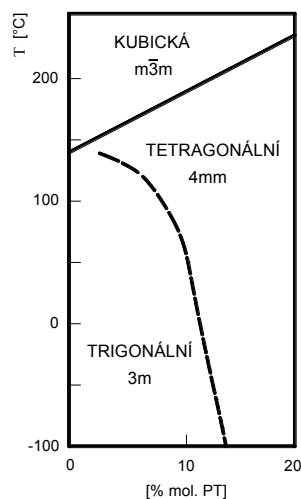
## 1. ÚVOD

Vývoj aktuátorů (tj. převodníků s mechanickým výstupem, řízených obvykle elektrickým polem) je v současnosti spjat s uplatněním nových, piezoelektricky velmi aktivních materiálů. Takovými materiály rozumíme monokrystalické látky s morfotropním fázovým rozhraním (MPB) na bázi tuhých roztoků relaxorů s  $\text{PbTiO}_3$  (PT), označovaných jako systémy relaxor – PT. Relaxory přitom rozumíme komplexní perovskity typu  $\text{Pb}(\text{B}_1\text{B}_2)\text{O}_3$ , kde  $\text{B}_1 = \text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Sc}^{3+}$ , ... a  $\text{B}_2 = \text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Ta}^{5+}$ , ... Pro relaxory je charakteristické, že jejich relativní permitivita závisí na teplotě a kmitočtu. Tato vlastnost je nazývána dielektrickou relaxací. V porovnání se stávajícími piezoelektrickými materiály dosahují systémy relaxor – PT některých výjimečných vlastností, zejména vysoké hodnoty koeficientu elektromechanické vazby  $k_{i\lambda}$ , piezoelektrického koeficientu  $d_{i\lambda}$ , relativní permitivity  $\varepsilon_{ij(r)}$  a deformace  $S_\lambda$  vyvolané elektrickým polem.

Cílem práce je přispět k důkladnějšímu poznání a doplnění souboru vlastností monokrystalů relaxor-PT. Experimentální měření jsou prováděna na vzorku s reprezentativním složením  $0,91\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{-}0,09\text{PbTiO}_3$  (PZN-9%PT). Přínosem jsou zejména výsledky, získané rezonančními metodami měření. Zjištěných vlastností je využito pro návrh aktuátoru stabilizujícího pracovní bod připravovaného jednovazkového laserového interferometru.

## 2. VLASTNOSTI MONOKRYSTALŮ PZN-PT

### 2.1 Vnitřní krystalová a doménová struktura



**Obr. 1** Fázový diagram systému PZN-PT  
**Fig. 1** Phase diagram of PZN-PT system

Na obr. 1 je zobrazen fázový diagram systému PZN-PT [3]. Tuhý roztok  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  krystalizující v trigonální soustavě, s  $\text{PbTiO}_3$ , krystalizujícím v tetragonální soustavě, má při pokojové teplotě své morfotropní fázové rozhraní v oblasti 9 až 9,5% molárního obsahu  $\text{PbTiO}_3$ . Při teplotě  $T > T_c$ , kde  $T_c$  je teplota fázového přechodu, mají tyto krystaly kubickou paraelektrickou strukturu se symetrií  $m\bar{3}m$ .

Po ochlazení na pokojovou teplotu překrystalizují v závislosti na složení do trigonální soustavy se symetrií 3m, do tetragonální soustavy se symetrií 4mm nebo do oblasti morfotropního fázového rozhraní. Výborné piezoelektrické vlastnosti mají i sloučeniny mimo oblast MPB [6], z hlediska materiálových vlastností jsou však nejzajímavější ta složení, jejichž obsah  $\text{PbTiO}_3$  nepřekročí 9% mol.

Piezoelektrické vlastnosti všech feroelektrických monokrystalů výrazně závisí na doménové struktuře [6], [7]. Vlastnosti jsou časově stálé a opakovatelné pouze v monodoménovém stavu nebo ve vytvořeném stabilním multidoménovém stavu. V následujícím textu jsou krystal a jeho mřížka popisovány systémem os, který je vztažen k vysokoteplotní kubické fázi. Směr orientace se vždy shoduje se směrem polarizace.

$$\begin{array}{cccccc|ccc}
 s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\
 s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\
 s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\
 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\
 d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}
 \end{array}$$

**Obr. 2** Elasto-piezo-elektrická matice krystalů se symetrií 4mm

**Fig. 2** Elasto-piezo-dielectric matrix of crystals of symmetry 4mm

Pro trigonální symetrii 3m je polárním směrem [111]. Lze proto předpokládat, že po polarizaci v tomto směru se vytvoří monodoménový stav a závislost deformace na elektrickém poli bude bez hystereze. Experimentální výsledky [6], [7] ale ukázaly významnou hysterezi, spojenou s velkou deformací. Toto chování je zřejmě způsobeno pohybem domén při působení elektrického pole, spojeném s depolarizací materiálu. Monodoménový stav krystalů orientovaných ve směru [111] je značně nestabilní.

Naopak při polarizaci trigonálního monokrystalu ve směru [001], který pro symetrii 3m není polární, je vytvořená doménová struktura stabilní [6]. Protože polárním směrem je [111], vytvoří se pravděpodobně multidoménová struktura, složená ze čtyř polárních směrů [111], [-111], [1-11] a [11-1]. Krystalové orientace [001] nemají při neobyčejně velkých prodlouženích téměř žádnou hysterezi.

S cílem nalézt optimální řez monokrystalu, který by dosahoval minimální hystereze a maximálních deformací, byla studována závislost vlastností materiálu na orientaci krystalu [6]. Zkoumány byly vzorky polarizované a orientované ve směru [001] +  $\alpha$ , kde  $\alpha$  je úhel odchylky od směru [001] ke směru

[111] ( $\alpha = 0^\circ$  odpovídá řezu [001],  $\alpha = 54,7^\circ$  řezu [111]). Při buzení vzorků slabým elektrickým polem deformace na velikosti  $\alpha$  příliš nezávisí. Při vyšší intenzitě elektrického pole ale s rostoucím  $\alpha$  roste velikost hystereze a s ní spojená depolarizace vzorku a saturace deformace. Čím více se orientace vzorku blíží směru [111], tím méně je doménová struktura stabilní. Optimální krystalografickou orientaci proto mají řezy ve směru [001].

Po polarizaci trigonálního krystalu ve směru [001] je sice mikroskopická symetrie stále 3m, ale makroskopicky se krystal chová tak, jako by měl tetragonální symetrii 4mm. Směr [001] je totiž pro 4mm směrem polárním. Vlastnosti těchto krystalů jsou tedy popisovány elasto-piezo-dielektrickou maticí pro symetrii 4mm (obr. 2). Tato matice má celkem jedenáct nezávislých fyzikálních konstant.

## 2.2 Piezoelektrické a dielektrické vlastnosti

V tab. 1 jsou uvedeny piezoelektrické a dielektrické vlastnosti vybraných monokrystalů PZN-PT a některých materiálů keramiky [3], [4], [6], [7]. Uvedené hodnoty  $d_{33}$  byly zjištěny rezonančním měřením ve slabých elektrických polích [1]. O chování monokrystalů PZN-PT při působení silných elektrických polí pojednává odstavec 2.3.

	materiál	$k_{33}$	$d_{33}$ [pC/N]	$\varepsilon_{33}^T(r)$	$T_C$ [°C]	ref.
monokrystal	PZN [111]	0,38	83	900	140	[6],
	[001]	0,85	1100	3600		[7]
	PZN-4,5%PT [111]	0,41	92	640	160	[3]
	[001]	0,92	2280	5000		
	PZN-8%PT [111]	0,39	84	1000	165	[6],
	[001]	0,94	2500	5000		[7]
	PZN-9%PT [111]	0,68	625	4100	178	[4]
	[001]	0,92	1570	2200		
	PZN-9,5%PT [111]	0,64	600	4300	176	[6]
	[001]	0,89	1600	1400		
	PZN-11%PT [001]	0,92	620	1000	200	[6]
	polykristalika	PZT 53/47	0,67	220	2000	360
PZT-5H (Navy VI)		0,75	590	3500	190	[6]
PMN-33%PT		0,73	690	5000	160	[6]
PSN-42%PT		0,77	450	2200	260	[6]

**Tab. 1** Piezoelektrické a dielektrické vlastnosti vybraných piezoelektrických materiálů

**Tab. 1** Piezoelectric and dielectric properties of selected piezoelectric materials

Trigonální krystaly orientované v polárním směru [111] mají velmi špatné piezoelektrické vlastnosti. Koeficienty  $k_{33}$  dosahují hodnot pouze  $\sim 0,40$  a  $d_{33}$  pouze  $\sim 80$  pC/N nezávisle na složení. Podobně jako PZT keramika mají nejlepší vlastnosti v oblasti MPB struktury, ale ani zde nedosahují  $k_{33}$  a  $d_{33}$  hodnot typických pro řezy ve směru [001]. Relativní permitivita roste se obsahem PT a svého maxima dosahuje v oblasti morfotropního fázového rozhraní.

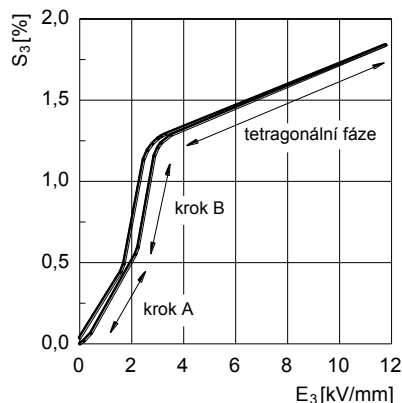
Krystaly orientované ve směru [001] dosahují vynikajících piezoelektrických vlastností i mimo oblast morfotropního fázového rozhraní. Koeficient  $d_{33}$  roste s obsahem PT a nejvyšší hodnoty dosahuje pro složení PZN-8%PT (2500 pC/N). I v oblasti MPB dosahují tyto řezy vysokých hodnot piezoelektrického koeficientu ( $\sim 1600$  pC/N), ovšem po přechodu morfotropního fázového rozhraní  $d_{33}$  rychle klesá až na hodnoty  $\sim 600$  pC/N v tetragonální fázi. Velikost  $k_{33}$  příliš nezávisí na složení materiálu a dosahuje velmi vysokých hodnot  $\sim 0,90$  v trigonální, MPB i tetragonální fázi. Relativní permitivita je závislá na symetrii krystalu. Zatímco tetragonální krystaly mají  $\varepsilon_{ij(r)}$  okolo 1000, trigonální krystaly mají  $\varepsilon_{ij(r)}$  mnohem vyšší, a to v rozsahu 3000–5000.

Jak je patrné z tab. 1 a z obr. 1, je hodnota Curieho teploty  $T_c$  relativně nízká ( $\sim 140^\circ\text{C} \div \sim 200^\circ\text{C}$ ), což omezuje použití na určitou teplotní oblast. Vynikající vlastnosti těchto monokrystalů jsou ale patrné při přímém porovnání s polykrystalickými materiály o podobné  $T_c$  v tab. 1.

### 2.3 Závislost deformace trigonálních krystalů na intenzitě elektrického pole

Piezoelektrické koeficienty jsou obvykle určovány pomocí rezonančních měření za slabých elektrických polí ( $< 10$  V/mm) [1]. Při působení silnějšího pole může v piezoelektrických aktuátorech docházet k pohybu domén, spojeném s přídatnou nelineární deformací a hysterezí, která ovlivňuje přesnost nastavení polohy. Plocha uvnitř hysterezní smyčky odpovídá tepelným ztrátám, které mají také nepříznivý vliv na chování aktuátoru. Proto je pro zjištění skutečných vlastností aktuátorů nutné určit přímou závislost deformace na intenzitě elektrického pole. Tím je možné definovat hysterezi i maximální úroveň deformace aktuátoru. Maximální dosažitelná deformace je omezena velikostí  $\varepsilon_{ij(r)}$ , saturací polarizace nebo dielektrickou pevností materiálu. Jak bylo uvedeno v odstavci 2.2, mají krystaly orientované ve směru [111] nízké hodnoty  $d_{33}$  ( $\sim 80$  pC/N), zjištěné při malé intenzitě elektrického pole. To je zřejmě důsledek částečné depolarizace materiálu při malém buzení [4]. Experimenty provedené ve [4] nebo [6] prokázaly, že při zvyšování intenzity elektrického pole dojde náhle k výrazné nelineární de-

formaci, spojené s velkou hysterezí. Ta je způsobena pohybem domén, vyvolaném působením elektrického pole. Při dalším zvyšování intenzity elektrického pole dojde po překročení hodnoty řádově 500 V/mm k téměř lineární deformaci bez hystereze. Teprve v této oblasti se patrně vytvoří stabilní monodoménová struktura. Chování krystalů orientovaných ve směru [111] je silně závislé na vnitřní stabilitě domén. Průběh závislosti deformace na intenzitě elektrického pole pro [001] orientované řezy je znázorněn na obr. 3 [6]. Pokud na krystal působí elektrické pole ve směru [001], přibližují se směry polarizací jednotlivých domén ke směru působícího pole. Tím dochází ke zvýšené deformaci trigonální mřížky. Tento proces, označený na obr. 3 jako krok A, odpovídá obrácenému piezoelektrickému jevu. Během tohoto kroku nedochází k reorientaci domén, protože deformace, způsobená borcením krystalové mřížky, se rovnoměrně rozloží do směrů jednotlivých domén. Celková struktura je pak stabilní. To je patrné důvod, proč mají tyto krystaly minimální hysterezi.



Obr. 3 Závislost deformace na elektrickém poli [001] orientovaných krystalů podle [2]

Fig. 3 Strain vs. electric field behavior of [001] oriented crystals from [2]

Při určité úrovni intenzity elektrického pole, jejíž hodnota je vzdálena intenzitě při maximální deformaci, dochází k náhlému zvětšení deformace (krok B na obr. 3). Nárůst je způsoben fázovým přechodem mezi trigonální a tetragonální fází v důsledku působení elektrického pole. Přibližování směrů jednotlivých domén ke směru působícího pole nakonec vyústí ve zhroucení všech polarizací do směru [001] a umělému vytvoření tetragonální fáze. Piezoelektrický koeficient  $d_{33}$ , spočítaný ze směrnice závislosti deformace na budícím poli v oblasti tetragonální fáze, odpovídá hodnotám zjištěným pro tetragonální krystaly orientované ve směru [001] (tab. 1).

Měřením deformace krystalu PZN - 8%PT [6] byla zjištěna při intenzitě elektrického pole  $\sim 12$  kV/mm maximální deformace o velikosti 1,7%, řádově vyšší než u piezokeramických materiálů.

### 3. STANOVENÍ VYBRANÝCH MATERIÁLOVÝCH KONSTANT

Významné materiálové vlastnosti jsme na našem pracovišti zjišťovali pomocí dynamických a statických metod měření. Vzorek se složením  $0,91\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-0,09\text{PbTiO}_3$  tvaru tyčinky s rozměry  $2a=2b=2$  mm a  $2l=6$  mm, hmotnosti  $m=0,15$  g a hustotě  $\rho=6250$  kg.m<sup>-3</sup> byl polarizován ve svém nepolárním směru [001] (délka tyčinky  $2l$  je rovnoběžná se směrem [001] = X<sub>3</sub>). Vzorek materiálu poskytla firma Crystal Associates, Inc. (USA). Při pokojové teplotě se struktura vzorku nalézá v oblasti MPB. V tyčince byly harmonickým elektrickým polem vybudeny podélné kmity, obvodovým a spektrálním analyzátozem HP 4195A zjištěno spektrum kmitů a pro základní harmonickou stanoven sériový a paralelní rezonanční kmitočty. Ze vzdálenosti obou rezonančních kmitočtů byl určen koeficient elektromechanické vazby

$$k_{33}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_{1r}}{f_{1a}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} \frac{f_{1a} - f_{1r}}{f_{1r}} \right), \quad (1)$$

kde za paralelní rezonanční kmitočty je považován kmitočty  $f_{1a}$ .

Poněvadž  $k_{i\lambda} = k_{33}$  je parametrem transcendentní rovnice

$$\operatorname{tg}(\eta_h) = \frac{\eta_h l}{k_{33}^2}, \quad (2)$$

kde  $l$  je poloviční délka tyčinky, lze vypočítat odpovídající vlnová čísla  $\eta_h$ .

Znalost vlnového čísla  $\eta_h$  a rezonančního kmitočtu  $f_{1r}$  umožňuje stanovit elastický koeficient  $s_{33}^E$  (při konstantním elektrickém poli) materiálu tyčinky a následně s pomocí vztahu

$$s_{33}^D = s_{33}^E (1 - k_{33}^2), \quad (3)$$

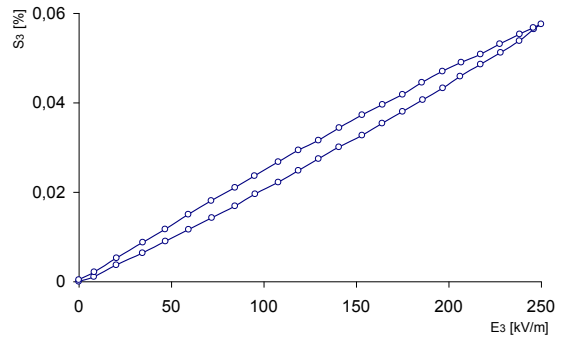
určit i hodnotu elastického koeficientu  $s_{33}^D$  při konstantním elektrickém posunutí.

Piezoelektrický koeficient  $d_{33}$  tyčinky byl stanoven z podélné deformace vyvolané silným elektrickým polem působícím ve směru délky tyčinky. Deformace byla měřena jednopaprskovým Michelsonovým He-Ne interferometrem o vlnové délce laserového paprsku  $\lambda = 632,8$  nm (obr. 4). Hodnota  $d_{33}$  byla stanovena ze vztahu

$$\Delta L = d_{33} \cdot E_3, \quad (4)$$

kde  $\Delta L$  je posunutí ve směru délky tyčinky. Pro změřenou podélnou deformaci tyčinky  $S_3 = 0,058$  %

byla určena hodnota piezoelektrického koeficientu  $d_{33} = 2300 \cdot 10^{-12}$  C/N.



**Obr. 4** Závislost deformace vzorku na intenzitě elektrického pole

**Fig. 4** Strain vs. E-field behavior of the sample

#### 3.1 Materiálové konstanty a parametry vzorku monokrystalu

Protože se několikrát měnila hmotnost elektrod rezonátoru, je nutné považovat následující hodnoty za efektivní. Hodnoty, zjištěné rezonančním měřením, odpovídají 1. harmonické rezonátoru.

Velikost relativní permitivity materiálu  $\epsilon_{33(r)}^T$  při konstantním elastickém napětí byla vypočtena ze vztahu (5) pro deskový kondenzátor

$$\epsilon_{33(r)}^T = \frac{2l \cdot C_0}{\epsilon_0 \cdot S}, \quad (5)$$

kde  $C_0$  je statická kapacita krystalu a  $S$  plocha elektrod.

##### 3.1.1 Materiálové konstanty

$s_{33}^E$	elastický koeficient	$162 \cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N
$s_{33}^D$	elastický koeficient	$28 \cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N
$d_{33}$	piezoelektrický koeficient	$2300 \cdot 10^{-12}$ C/N
$\epsilon_{33(r)}^T$	relativní permitivita	4360
$k_{33}$	koef. elektromech.vazby	0,91
$\eta_1$	vlnové číslo	$235$ m <sup>-1</sup>
$Tf_1^{(1)}$	teplot. činitel kmitočtu 1. řádu	$-1,9 \cdot 10^{-3}$ K <sup>-1</sup>
$Tf_1^{(2)}$	teplot. činitel kmitočtu 2. řádu	$-7,8 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-2</sup>

##### 3.1.2 Parametry elektrického náhradního obvodu pro úroveň buzení 0 dBm

$C_0$	statická kapacita	25,75	pF
$C_1$	dynamická kapacita	22,24	pF
$L_1$	dynamická indukčnost	0,174	H
$R_1$	sériový náhradní odpor	1,91	kΩ
$Q_1$	činitel jakosti	47	

#### 4. IDEOVÝ NÁVRH AKTUÁTORU OPTICKÉHO LASEROVÉHO SYSTÉMU

U Michelsonova interferometru dochází v průběhu času k posunu optické dráhy paprsků a tím ke změně interferenčního obrazce. Časová změna optické dráhy, způsobená kolísáním teploty a mechanickými vibracemi, snižuje přesnost a rozlišení interferometru. Při analýze velmi malých posunutí ovlivňuje optická nestabilita výsledky měření již výrazně.

V praxi se stabilizace optického systému provádí pomocí stejnosměrné zpětnovazební smyčky [9], [10], umístěné do referenční větve interferometru. Referenční zrcátko je připevněno na piezoelektrickém aktuátoru, který svým pohybem udržuje konstantní optickou dráhu paprsku (obr. 6). Stejnosečná složka napětí fotodiody, získaná nízkofrekvenčním filtrem s mezním kmitočtem okolo 5 Hz, je v diferenciálním zesilovači porovnána s referenčním napětím  $U_{REF}$  a výsledný signál je zesílen ve stejnosměrném zesilovači. Ten vytváří řídicí signál pro piezoelektrický aktuátor. Výstupní napětí stejnosměrného zesilovače se v závislosti na použitém aktuátoru pohybuje v řádu  $10^2 - 10^3$  V.

S cílem dosáhnout co nejnižšího řídicího napětí je použito konstrukčního uspořádání mnohvrstvé struktury. Mnohvrstvý aktuátor je složen z  $n$  vrstev (piezoelektrických destiček), mezi nimiž jsou vnitřní elektrody. Sousední vrstvy mají opačný směr polarizace. Vnitřní elektrody přitom pokrývají celou plochu vrstvy. Toto provedení je výhodné s ohledem na rovnoměrné rozložení deformace po celé ploše. Nedochází pak ke koncentraci mechanického napětí v jednom místě, zpravidla spojené s tvořením prasklin. Na krajích aktuátoru jsou vnitřní elektrody spojeny s vnějšími elektrodami shodné polarity, od vnějších elektrod opačné polarity je provedena izolace skleněným povlakem. Vnitřní elektrody jsou vyrobeny ze zlata, podložené vrstvou chrómu. Tloušťka elektrod je podobně jako u keramických aktuátorů 2  $\mu\text{m}$ .

Jedna vrstva spolu s elektrodami tvoří element mechanického posunutí. Výsledné prodloužení aktuátoru  $\Delta L$  je přímo úměrné počtu vrstev  $n$

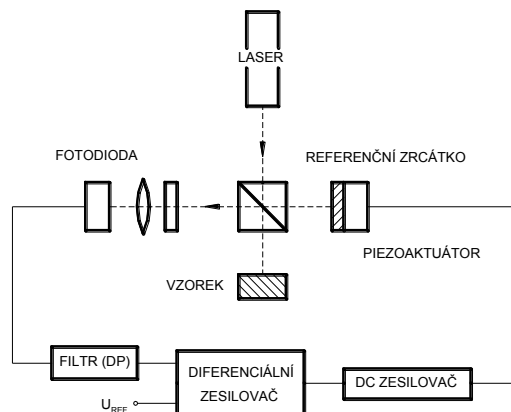
$$\Delta L = n \cdot d_{33} \cdot U, \quad (6)$$

kde  $U$  je napětí přiložené na vnější elektrody.

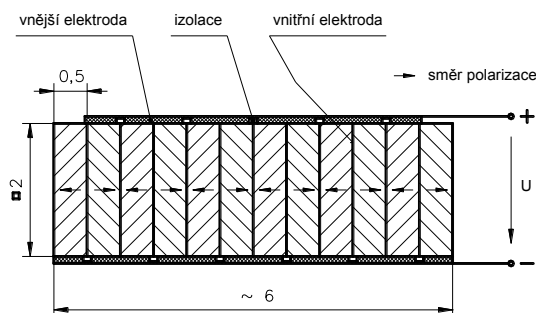
Navržený aktuátor (obr. 7) je složen z dvanácti vrstev monokrystalu PZN-9%PT, orientovaných a polarizovaných ve směru [001], o velikosti  $2 \times 2 \times 0,5$  mm<sup>3</sup>. Celková délka je přibližně 6 mm. Tloušťka vrstvy 0,5 mm je přijatelná pro předpokládanou technologii výroby, tj. řezání a broušení krystalu.

Celkové posunutí lze vypočítat z rovnice (6) pro  $n = 12$  a  $d_{33} = 2300 \cdot 10^{-12}$  C/N. Pro napětí 100 V je dosažitelné prodloužení 2,76  $\mu\text{m}$ , tedy deformace 0,046%. Při stabilizaci optické dráhy interferometru

bude typicky požadované posunutí o velikosti vlnové délky světla laseru  $\lambda = 632,8$  nm. Potřebné řídicí napětí aktuátoru je pak pouze 23 V.



Obr. 6 Zpětnovazební smyčka interferometru  
Fig. 6 Interferometer feedback



Obr. 7 Mnohvrstvý aktuátor  
Fig. 7 Multilayer actuator

Toto řešení umožňuje napájet aktuátor napětím několika desítek voltů. Při zapojení do zpětné vazby podle obr. 6 lze aktuátor budít přímo z diferenciálního zesilovače s vhodnou úrovní napětí na výstupu. Není nutné použít stejnosměrný zesilovač, vytvářející napětí několika stovek voltů, a je tak možné zjednodušit zpětnovazební smyčku optického systému. Pro srovnání, piezoelektrický aktuátor, používaný při měření deformace zmíněném v odstavci 3, dosahoval prodloužení 1,5  $\mu\text{m}$  při vstupním napětí 1000 V.

#### 5. DISKUSE

Na tomto místě je vhodné poznamenat, že velikost koeficientu elektromechanické vazby  $k_{33}$  může být určena ze závislosti uvedené v [1]

$$k_{33} = \sqrt{\frac{d_{33}^2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{33}^T(r) \cdot s_{33}^E}}, \quad (7)$$

Tato hodnota je platná pro piezoelektrický element, pracující mimo oblast rezonance [2]. Po dosa-

zení výše uvedených hodnot vyjde  $k_{33}$  přibližně 0,92, což je hodnota prakticky shodná s velikostí  $k_{33}$ , zjištěné z dynamického vztahu (1).

Ve [3] je pro tento materiál uvedena velikost  $d_{33}$  pouze 1570 pC/N, což je téměř o třetinu nižší než  $d_{33}$  zjištěné v této práci. Tento rozdíl je způsoben hlavně tím, že hodnota relativní permitivity vzorku [3] byla pouze 2200, a z menší míry také použitou metodou výpočtu. Ve [3] byla nejprve určena hodnota  $k_{33}$  ze vztahu (1), a potom zpětně vypočítána velikost  $d_{33}$  pomocí vztahu (7). Podle [2] však nemusí být vztahy (1) a (7) zcela ekvivalentní, a tak může být výpočet podle [3] zatížen jistou chybou.

## 6. ZÁVĚR

Monokrystaly typu relaxor-PT, zastoupené složením PZN-PT, představují novou generaci materiálů pro vysoce výkonné aktuátory. V porovnání s dnešními keramickými materiály se vyznačují nadprůměrnými piezoelektrickými a dielektrickými vlastnostmi.

Krystalové řezy, orientované a polarizované ve směru [001], mají při pokojové teplotě vysoké piezoelektrické koeficienty  $d_{33}$  (až 2500 pC/N). Dosahují velkých deformací, přičemž závislost deformace na intenzitě elektrického pole je téměř bez hystereze. Koeficient elektromechanické vazby  $k_{33}$  větší než 0,90 v celé oblasti složení umožňuje vytvářet elektromechanické převodníky s mimořádně krátkou odezvou na řídicí signál, pracující v širokém pásmu kmitočtů. Značný rozsah hodnot relativní permitivity  $\varepsilon_{ij(r)}$  dovoluje navrhovat aktuátory s optimální elektrickou impedancí. Vysoká hodnota elektrické pevnosti těchto materiálů umožňuje zatížení silným elektrickým polem. Při velké intenzitě elektrického pole lze dosáhnout mimořádných deformací (až 1,7%) jako výsledek fázového přechodu mezi trigonální a tetragonální fází. Uvedených vlastností PZN-9%PT jsme využili pro návrh aktuátoru přesných a relativně velkých mechanických posunutí, potřebných v obvodu stabilizace pracovního bodu nově konstruovaného jednosvazkového laserového interferometru. Pracovní oblast je omezena poměrně nízkou hodnotou Curieho teploty  $T_c$  ( $< 200$  °C).

## PODĚKOVÁNÍ

Těchto výsledků bylo dosaženo za přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci podpory projektů výzkumu a vývoje, identifikační kód projektů MSM 242200002 a VS 96006.

## LITERATURA

[1] ANSI/IEEE Std. 176-1987, IEEE Standard on Piezoelectricity. IEEE, New York 1987.

- [2] Chang, S. H., Rogacheva, N. N., Chou, C. C.: IEEE Transactions for Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control. **42**, 4, (1995), 630.
- [3] Kuwata, J., Uchino, K., Nomura, S.: Japanese Journal of Applied Physics. **21**, 9, (1982), 1298.
- [4] Liu, S.-F., Park, S.-E., ShROUT, T.R., Cross, L.E.: Journal of Applied Physics. **85**, 5, (1999), 2810.
- [5] Nosek, J.: Některé jevy vyšších řádů v elektromechanických systémech využívajících objemových a povrchových akustických vln. Výzkumná zpráva projektu VS 96006. TU v Liberci 1996.
- [6] Park, S.-E., ShROUT, T.R.: Journal of Applied Physics. **82**, 4, (1997), 1804.
- [7] Park, S.-E., ShROUT, T.R.: IEEE Transactions for Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control. **44**, 5, (1997), 1140.
- [8] Pustka, M.: Aktuátor malých posunutí. Diplomová práce. TU v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezipodoborových inženýrských studií, červen 2000.
- [9] Uchino, K.: Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London 1996.
- [10] Zhang, Q.M., Pan, W.Y., Cross, L.E.: Journal of Applied Physics. **63**, 8, (1988), 2492.

## BIOGRAPHY

Martin Pustka was born on 17. 5. 1977. In 2000 he graduated (M.Sc.) at the Department of Electrical Engineering and Electromechanical Systems of the Faculty of Mechatronics and Interdisciplinary Studies at TU of Liberec. Since 2002 he is Ph.D. student at this department. His primary research interests have been modern piezoelectric materials and their application in sensors and actuators.

Jaroslav Nosek was born on 12. 11. 1944. He received the M.Sc. degree in Electrical Engineering in 1968 and the Ph.D. degree in Theoretical Electrotechnics in 1983, both from the Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University, Prague. In 1997, he graduated also in Radioelectronics from Czech Technical University in Prague, he is a Professor of Physics. Presently, he is a Head of Department of Electrical Engineering and Electromechanical Systems at TU of Liberec, Faculty of Mechatronics and Interdisciplinary Studies. His research interests have been the nonlinear properties of piezoelectric crystals, modeling of BAW resonators structures and measurement of their properties including the intermodulation. He is interested also in the use of suitable properties of SAW piezoelectric resonators

for the conversion of physical quantities to electric signal. He is an IEEE member.