

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: 2612T – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Přírodovědné inženýrství

Teplovní závislosti piezoelektrických koeficientů PZT keramik

Temperature dependence of piezoelectric coefficients of PZT ceramics

Kateřina Suchardová

Vedoucí práce: RNDr. Miroslav Šulc

Konzultant: Doc. Mgr. Lidmila Burianová, Csc.

Rozsah práce: 89 stran

Počet stran textu: 73

Počet stran příloh: 16

Datum: 24.5.2002

Anotace

Cílem diplomové práce je určení teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů polarizovaných PZT ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$) keramik metodou laserové interferometrie.

Měření bylo prováděno se vzorky typového označení APC 840, APC 850, APC 856 a APC 880 dodané firmou Piezokeramika s.r.o. Libřice. Vzorky byly měřeny pomocí mikrointerferometru. Byly určeny všechny piezoelektrické koeficienty d_{31} , d_{33} a d_{15} polarizované PZT keramiky při pokojové teplotě a teplotní závislosti těchto koeficientů. Chyba určení piezoelektrických koeficientů pro danou metodu a dané uchycení vzorků v mikrointerferometru byla stanovena přibližně na 12%.

Grafy určených teplotních závislostí znázorňují klesající hodnotu piezoelektrického koeficientu se snižující se teplotou v měřeném teplotním intervalu. Klesající charakter průběhu je dán snižující se pohyblivostí doménových stěn PZT keramiky s klesající teplotou.

Annotation

The aim of thesis is to determinated of temperature dependence of piezoelectric coefficients for polarized PZT ceramics.

Measurement was done with samples of type mark APC 840, APC 850, APC 856 and APC 880 from company Piezokeramika s.r.o Libřice. The samples were measured with help of mikrointerferometr. All piezoelectric coefficients d_{31} , d_{33} and d_{15} of polarized PZT ceramic were determined at room temperature and its temperature dependence were determined too. The error of piezoelectric coefficients determination was estimated at approximately 12% for this method and this fixation of samples in the mikrointerferometr.

Graphs of temperature dependences demonstrade decreasing value of piezoelectric coefficients with decreasing temperature in measurament temperature rengo. The falling character is done by decreasing domain wall motion of PZT ceramic with decreasing temperature.

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 24. 5. 2002

Podpis: *Richarda Kalina*

Poděkování

Chtěla bych vyjádřit své poděkování především RNDr. M. Šulcovi za odborné vedení mé diplomové práce. Dále děkuji Prof. V. Janovcovi za poskytnuté konzultace a Doc. J. Erhartovi za pomoc s přípravou vzorků a případné konzultace.

Zvláštní poděkování patří mým rodičům za finanční podporu mého studia na Technické univerzitě v Liberci.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra fyziky

Akademický rok: 2001/2002

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: Kateřinu Suchardovou

studijní program: 2612T – Elektrotechnika a informatika

obor: Přírodovědné inženýrství

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu:

Teplotní závislosti piezoelektrických koeficientů PZT keramik

Zásady pro vypracování:

1. Změřte piezoelektrické koeficienty d_{33} , d_{31} , d_{15} u 5 různých druhů PZT keramik při pokojové teplotě.
2. Navrhněte a odzkoušejte metodiku měření teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů.
3. Otestujte stabilitu mikrointerferometru při teplotách blízkých 20 K.
4. Změřte piezoelektrické koeficienty pro zkoumané typy PZT keramik v co nejširším dosažitelném teplotním intervalu.
5. Porovnejte vzájemně teplotní závislosti piezoelektrických koeficientů měřených typů keramik

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 až 50 stran

Seznam odborné literatury:

- [1] Jaffe B., Cook W.R., Jaffe H., Piezoelectric ceramics, Academic Press, London, 1971
- [2] Waanders J.W., Piezoelectric Ceramics, Philips Components, Eindhoven, 1991
- [3] Šulc M., Burianová L., Studium piezoelektrických dějů pomocí laserové interferometrie, Jemná mechanika a optika 10/01, p. 338-343,
- [4] M. Šulc, D. Barošová: Laser Interferometry for Piezoelectric Material Study – Possibilities and Limits Ferroelectrics, 1999, Vol.224, pp.129-136
- [5] L.Burianová, M.Šulc, M.Prokopová : Determination of the piezoelectric coefficients d_{ij} of PZT ceramics and composites by laser interferometry, J.European Ceramic Society 21 (2001), 1387-1390
- [6] M. Šulc, L. Burianová, J. Nosek: On the precision of the new laser interferometer in a wide temperature range. Ann. Chim. Sci. Mat., 26 (2001), 43-48
- [7] D.S.Paik et al., Dielectric and piezoelectric properties of perovskite materials at cryogenic temperatures, J.Mat.Sciencies, 34 (1999), 469-473

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Miroslav Šulc

Konzultant: Mgr.Lidmila Burianová, CSc.

Zadání diplomové práce: 22.10.2001

Termín odevzdání diplomové práce: 25. 5. 2002



.....

Vedoucí katedry

.....

Děkan

V Liberci dne 22.10.2001

Obsah

Obsah.....	6
Použité fyzikální veličiny.....	9
ÚVOD.....	11
TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1. Piezoelektrický jev a některé jevy s ním spojené.....	13
1.1 Piezoelektrický jev.....	13
1.1.1 Symetrie a piezoelektrický jev.....	13
1.1.2 Tenzorový popis piezoelektrického jevu.....	14
1.1.3 Nelineární chování piezoelektrických koeficientů s teplotou.....	15
1.2 Feroelektrický jev.....	15
1.3 Pyroelektrický jev.....	16
1.4 Jev elektrostrikční deformace.....	17
2. PZT keramika.....	18
2.1 Struktura a výroba PZT keramiky.....	18
2.2 Vytvoření a možné porušení spontánní polarizace PZT keramiky.....	18
2.3 Stavový diagram PZT keramiky.....	19
2.3.1 Morfotropní fázová hranice.....	20
2.4 Popis materiálových vlastností polarizované PZT keramiky.....	21
2.5 Výhody a nevýhody polarizované PZT keramiky.....	21
2.6 Aplikace polarizované PZT keramiky dle plochy hysterézní smyčky.....	22
3. Polarizovaná PZT keramika jako rezonátor.....	23
3.1 Vybuzené kmity vzorku dané polarizované PZT keramiky.....	23
4. Experimentální metody pro stanovení piezoelektrických koeficientů.....	24
5. Laserová interferometrie.....	25
5.1 Princip interferometrie.....	25
5.1.1 Princip interference dvou elektromagnetických vln.....	25
5.1.2 Interferenční rovnice dvou elektromagnetických vlnění o stejné světelné intenzitě.....	26

5.1.3	Interferenční obrazce dvou elektromagnetických vlnění.....	27
5.2	Laser.....	28
5.3	Polarizace světla.....	28
5.3.1	Odraz a lom polarizované elektromagnetické vlny	29
5.3.2	Optická polarizační zařízení	29
5.4	Aplikace interferometrie	31
6.	Určení piezoelektrických koeficientů pomocí laserové interferometrie	32
6.1	Princip určení piezoelektrického posunutí stěny vzorku	32
6.2	Pracovní bod a kalibrace interferometru.....	34
6.3	Výpočet piezoelektrických koeficientů.....	35
7.	Typy laserových interferometrů pro měření piezoelektrických koeficientů	36
7.1	Jednopaprskový Michelsonův interferometr.....	36
7.2	Mikrointerferometr	37
7.3	Deltamikrointerferometr	39

PRAKTICKÁ ČÁST.....	42
8. Sestava mikointerferometru.....	43
8.1 Optické komponenty sestavy mikointerferometru (<i>obr.8.1</i>) a jejich funkce....	45
8.2 Uchycení vzorků v mikointerferometru (<i>obr. 8.2</i>)	48
8.3 Teplotní komůrka kryostatu (<i>obr.8.1</i>).....	50
8.4 Měřicí, řídicí a přídavný aparát mikointerferometru (<i>obr. 8.1</i>)	51
9. Vzorky polarizované PZT keramiky.....	54
9.1 Příprava vzorků na měření metodou laserové interferometrie.....	55
9.1.1 Vzorky pro určení piezoelektrických koeficientů d_{33} a d_{31}	55
9.1.2 Vzorky pro určení piezoelektrického koeficientu d_{15}	56
9.2 Kritéria pro měření piezoelektrických vzorků	57
9.3 Upnutí vzorků do držáčku interferometru.....	58
9.3.1 Způsob uchycení jednotlivých vzorků.....	59
10. Pracovní postup	60
11. Stanovení chyb.....	63
12. Výsledky měření	65
12.1 Naměřené výsledky.....	65
12.2 Charakteristiky	67
13. Návrhy na možné zpřesnění výsledků	70
ZÁVĚR.....	71
Použitá literatura	72
PŘÍLOHY	74

Použité fyzikální veličiny

d	Tenzor piezoelektrických koeficientů
d_{ijk}	Složky tenzoru d
d_{iy}	Složky matice piezoelektrických koeficientů
$\vartheta(d_{iy})$	Relativní chyba výpočtu piezoelektrického koeficientu d_{iy}
d_0	Amplituda kmitů stěny piezoelektrického vzorku
$\vartheta(d_0)$	Relativní chyba měřicí metody-laserové interferometrie a zároveň chyba určení posunutí d_0
E	Vektor intenzity elektrického pole
E_C	Koercitivní elektrické pole
E_k	Složky vektoru E
f	Frekvence budícího napětí U_A
I	Výsledná světelná intenzita interference dvou elektromagnetických vlnění o stejné intenzitě světla
$I_{\max}$	Maximální hodnota světelné intenzity I
$I_{\min}$	Minimální hodnota světelné intenzity I
I_0	Světelná intenzita referenční a sondující větve interferometru
p	Pyroelektrický koeficient
P	Vektor elektrické polarizace
p_i	Složky vektoru p
P_i	Složky vektoru P
P_r	Zbytková (remanentní) polarizace
P_S	Spontánní polarizace
S	Tenzor mechanické deformace
S_{ij}	Složky tenzoru S
t	Délka vzorku ve směru přiloženého elektrického pole
U	Střední hodnota elektrického napětí odpovídající světelné intenzitě I
U_A	Amplituda harmonického budícího napětí piezoelektrického vzorku
$U_{\max}$	Střední hodnota elektrického napětí odpovídající světelné intenzitě $I_{\max}$
$\vartheta(U_{\max})$	Relativní chyba určení hodnoty $U_{\max}$

$U_{\min}$	Střední hodnota elektrického napětí odpovídající světelné intenzitě $I_{\min}$
$\vartheta(U_{\min})$	Relativní chyba určení hodnoty $U_{\min}$
U_{out}	Efektivní hodnota elektrického napětí úměrná d_0
$\vartheta(U_{\text{out}})$	Relativní chyba určení hodnoty U_{out}
U_p	Střední hodnota elektrického napětí odpovídající nastavení pracovního bodu interferometru
x	Aktivní délka vzorku ve směru měřené deformace vzorku
$\vartheta(x)$	Relativní chyba určení délky x
σ	Entropie
Θ	Teplota
Θ_C	Curieho teplota
φ	Fázový rozdíl světelného vlnění referenční větve vůči sondující větvi interferometru
λ	Vlnová délka laserového světla

ÚVOD

V poslední době se stále více setkáváme v nejrůznějších odvětvích s aplikacemi piezoelektrických elementů, právě pro jejich dobrou miniaturizaci, ostré vymezení rezonanční frekvence a výraznou citlivost na vnější efekty. Tyto elementy se poté používají jako rezonátory, aktuátory, převodníky, nebo jako senzory nejrůznějších fyzikálních veličin na veličiny elektrické.

Široké spektrum aplikací piezoelektrických materiálů si vyžaduje dokonalou znalost jejich chování, tedy i znalost teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů.

Pro měření piezoelektrických koeficientů se ukazuje být nejvhodnější metoda laserové interferometrie. Jedná se o bezdotykovou velice přesnou a citlivou metodu. Na Technické univerzitě v Liberci jako první naměřili chování piezoelektrických koeficientů v širokém rozsahu teplot právě pomocí laserové interferometrie. Pro tento účel byl navržen RNDr. M. Šulcem vhodný interferometr nazvaný mikrointerferometr [1].

Tato diplomová práce se zabývá měřením teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů polarizované PZT keramiky pomocí mikrointerferometru.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Piezoelektrický jev a některé jevy s ním spojené

1.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev byl poprvé popsán a jednoznačně prokázán bratry Curieovými v letech 1880-81 u krystalů turmalínu. Teprve v roce 1894 fyzik Voigt přesně formuloval teorii piezoelektriny na základě termodynamických principů [2].

Piezoelektrický jev je dvojího druhu, přímý a převrácený, nazývaný též jako inverzní. Vlivem mechanického napětí nebo deformace piezoelektrického materiálu vzniká ve vzorku v určitém směru elektrická polarizace. Tento jev je nazván přímým piezoelektrickým jevem. Naopak přiložené elektrické pole na tomto materiálu způsobí mechanické napětí nebo jeho deformaci. Pozorujeme inverzní piezoelektrický jev. Oba tyto jevy jsou spolu vzájemně vázány.

Piezoelektrické látky jsou takové látky, u kterých se vyskytuje piezoelektrický jev. Některé piezoelektrické materiály mohou vykazovat vedle piezoelektrického jevu i pyroelektrický a feroelektrický efekt. Tyto efekty jsou podmíněny symetrií materiálu.

1.1.1 Symetrie a piezoelektrický jev

Symetrie je určena uspořádáním atomů do krystalické mříže. Jestliže v daném materiálu existují směry spontánní polarizace, které jsou dovoleny symetrií, pak je materiál feroelektrický. Takový materiál je i pyroelektrický, a tudíž je i vždy piezoelektrický.

Piezoelektrina se nevyskytuje ve strukturách se středem souměrnosti, jelikož polarizace je vektorová veličina, která není středově souměrná. Dále se tento jev nevyskytuje u materiálů s vysokou souměrností kubické soustavy [3].

Piezoelektrinu vykazují některé látky s krystalickou strukturou (například křemen, gárium orthofosfát a berlinit), některé fáze perovskitové struktury (například polarizovaná keramika PZT), ale i některé organické látky.

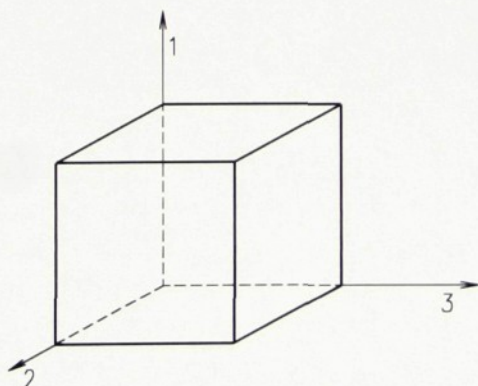
1.1.2 Tenzorový popis piezoelektrického jevu

Je-li daný materiál anizotropní z hlediska struktury, je anizotropní i z hlediska materiálových vlastností. To znamená, že v různých směrech látka vykazuje různě velké materiálové vlastnosti, které se popisují tenzory. Popis materiálových vlastností lze vyjádřit ze stavových rovnic. Jeden z možných způsobů vyjádření piezoelektrického koeficientu je pomocí elektrického pole a mechanické deformace při konstantní entropii [4].

Elektrické pole $\mathbf{E}$ jako příčina působí na piezoelektrický materiál a může v něm vyvolat mechanickou deformaci $\mathbf{S}$. Mechanická deformace $\mathbf{S}$ je tenzor druhého řádu a elektrické pole $\mathbf{E}$ je vektor. Koeficient úměrnosti obou těchto veličin je dán tenzorem třetího řádu $\mathbf{d}$. Tento tenzor se nazývá tenzor piezoelektrických koeficientů a jeho složky určují lineární závislost složek mechanické deformace $\mathbf{S}$ a elektrického napětí $\mathbf{E}$ při konstantní entropii σ [3].

$$S_{ij} = d_{ijk}^\sigma \cdot E_k \quad i,j,k = 1,2,3 \quad (1.1)$$

Složky tenzorů závisí na soustavě souřadnic. Proto volíme pro popis materiálových vlastností jednotnou základní soustavu souřadnic. Jedná se o pravotočivou pravoúhlou soustavu souřadnic.



Obr. 1.1: Vzorek umístěný v pravoúhlé pravotočivé soustavě souřadnic (1, 2, 3).

Vzhledem k symetrii materiálu jsou některé složky tenzoru piezoelektrických koeficientů nulové a jiné jsou si rovny. S rostoucí symetrií klesá počet nezávislých piezoelektrických koeficientů.

Na základě vnitřní symetrie tenzoru piezoelektrických koeficientů $\mathbf{d}$ lze provést přiřazení indexů jeho složek jk indexu γ , který nabývá hodnot od 1 do 6. Získáme tak složky matice piezoelektrických koeficientů $d_{i\gamma}$, které jsou v praxi více užívanější.

1.1.3 Nelineární chování piezoelektrických koeficientů s teplotou

Piezoelektrický koeficient je složen z nevlastního (extrinsic) a vlastního (intrinsic) příspěvku [5, 6]. Příspěvek homogenního (jednodoménového) materiálu se nazývá vlastní příspěvek a v piezoelektrické látce existuje vždy. Nevlastní příspěvek je způsoben pohybem doménových stěn, a tudíž se dá potlačit.

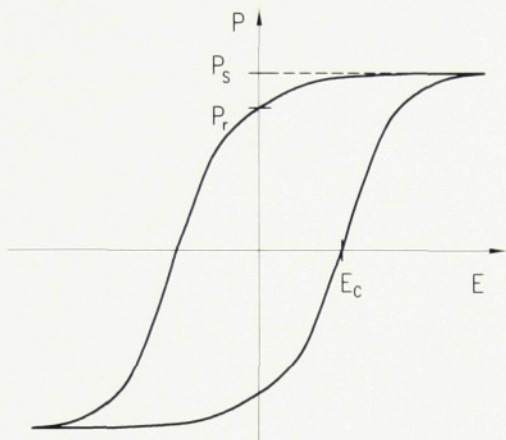
1.2 Feroelektrický jev

Ve feroelektrických látkách existují ekvivalentní směry spontánní polarizace. Oblast s konstantní spontánní polarizací se nazývá doména a je ohraničena doménovou stěnou. Doménové stěny mohou být neferoelastické a feroelastické. Neferoelastické doménové stěny jsou mezi doménami, jejichž spontánní deformace jsou stejné. Zato feroelastické stěny jsou mezi doménami s různou spontánní deformací. Pohyb feroelastických doménových stěn ovlivňuje piezoelektrické vlastnosti materiálu [5].

Zamezení pohybu doménových stěn lze dosáhnout dvojím způsobem [6]:

- a) Při teplotě blízké 0K.
- b) Při frekvencích nad 1GHz.

Feroelektrické látky vykazují hysterézi. Tvar hysterézní smyčky závisí na frekvenci a velikosti elektrického pole přiloženého na vzorek.



Obr. 1.2.: Hysterézní smyčka podle [7] popisující závislost elektrické polarizace $\mathbf{P}$ na velikosti elektrického pole $\mathbf{E}$.

Vysvětlivky:

P_r – remanentní (zbytková polarizace)

P_s - spontánní polarizace

E_c - koercitivní elektrické pole.

Přiložené elektrické pole způsobuje růst domén, které mají výsledný moment spontánní polarizace ve směru elektrického pole. Při překročení koercitivního elektrického pole E_c dochází k úplné přepolarizaci, čili výsledná spontánní polarizace má opačný směr vůči původnímu stavu. Dielektrickým ztrátám způsobeným přepolarizací materiálu odpovídá plocha hysterézní smyčky.

Důležitým parametrem feroelektrik je Curieho teplota Θ_c . Je to teplota fázového přechodu mezi paraelektrickou a feroelektrickou fází. Pod Curieho teplotou je materiál feroelektrický a nad ní se stává paraelektrickým.

1.3 Pyroelektrický jev

Při změně teploty dochází u pyroelektrických látek ke změně spontánní polarizace. To se projevuje vznikem vázaného elektrického náboje na povrchu materiálu, který je postupně vykompenzován volnými náboji v okolním prostředí a vlivem vlastní vodivosti daného materiálu.

Pyroelektrický jev je charakterizován pyroelektrickým koeficientem. Pyroelektrický koeficient p vyjadřuje změnu polarizace $\mathbf{P}$ danou jednotkovou změnou teploty Θ [3].

$$P_i = p_i \cdot \Theta \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.2)$$

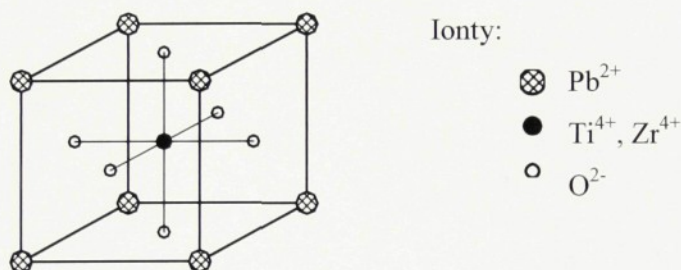
1.4 Jev elektrostrikční deformace

Přiložením elektrického pole na látku dochází vždy k její deformaci. Tento jev se nazývá elektrostrikce a vykazují ji všechny materiály [6]. Elektrostrikční deformace závisí kvadraticky na velikosti elektrického pole. Jedná se o efekt druhého řádu vzhledem k intenzitě elektrického pole.

2. PZT keramika

2.1 Struktura a výroba PZT keramiky

PZT keramika je polykrystalická látka na bázi tuhých roztoků oxidu zirkonu (PbZrO_3) a titanu (PbTiO_3). Oxid PbZrO_3 je označován jako PZ a PbTiO_3 je označován jako PT. Základní buňka PZ a PT má perovskitovou krystalovou strukturu.



Obr. 2.1: Základní buňka perovskitové struktury oxidů PZ a PT. Převzato z [8].

Práškovou metalurgií se z oxidů PZ a PT vyrábí polykrystalický materiál $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$, který je označován jako PZT keramika. Na procentním zastoupení PZ závisí vlastnosti PZT keramiky. Keramika se upravuje malým množstvím příměsí (například železo, lanthan, niob), které výrazně ovlivňují její materiálové vlastnosti [7].

Takto vyrobená keramika je paraelektrická a nepiezoelektrická. V paraelektrické fázi má keramika kubickou symetrii $\bar{m}3m$, danou náhodným uspořádáním zrn.

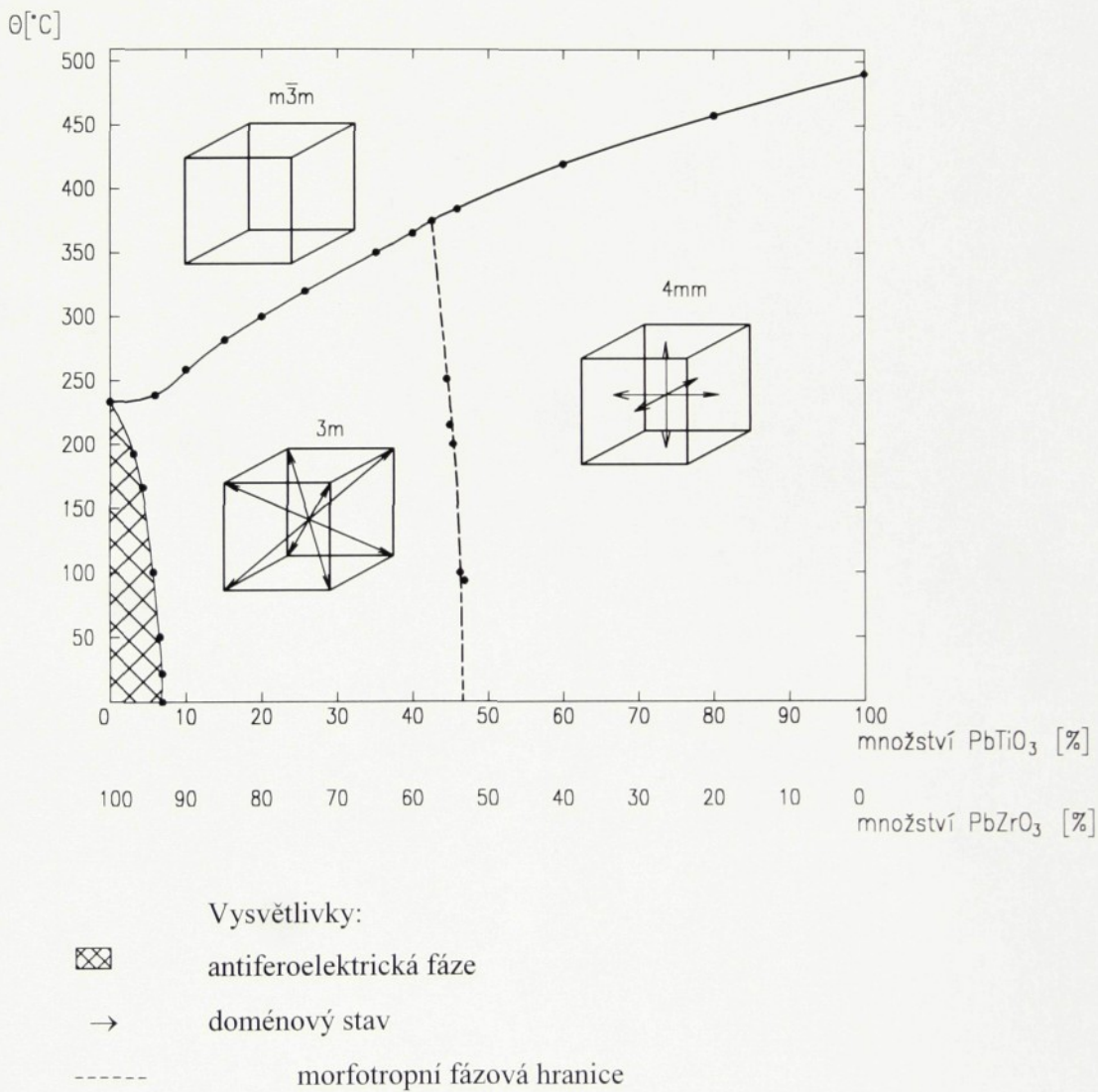
2.2 Vytvoření a možné porušení spontánní polarizace PZT keramiky

Aby byla PZT keramika piezoelektrická, musí se polarizovat silným elektrickým polem řádově kilovoly na milimetr [7]. Polarizovaná PZT keramika vykazuje spontánní polarizaci a je tudíž feroelektrická.

Spontánní polarizace PZT keramiky nemusí být stálá. Působením vnějších polí může dojít k zeslabení spontánní polarizace, takzvané depolarizaci.

Ztráta spontánní polarizace nastává také při ohřátí PZT keramiky nad Curieho teplotu. Dále může dojít ke změně směru spontánní polarizace přepolarizací (viz. kap.: 1.2) polarizované PZT keramiky.

2.3 Stavový diagram PZT keramiky



Obr. 2.2: Stavový diagram PZT keramiky dle [7, 8]. Popisuje symetrii PZT keramiky v závislosti na teplotě Θ a procentuálním zastoupení složek PT a PZ v PZT keramice.

Ve feroelektrické fázi má PZT makroskopickou symetrii ∞ mm. Tato symetrie je dána složením dílčích symetrií jednotlivých zrn. Tuhý roztok PT má ve feroelektrické fázi tetragonální (čtverečnou) symetrii 4mm. Oxid PZ vykazuje ve feroelektrické fázi trigonální (romboedrickou) symetrii 3m, nebo je antiferoelektrický s ortorombickou (kosočtverečnou) symetrií.

Vlivem symetrie mohou v látce existovat různé doménové stavy s ekvivaltními směry spontánní polarizace. Počet možných doménových stavů v látce lze určit ze znalosti symetrie paraelektrické a feroelektrické fáze. V symetrii 4mm existuje 6 doménových stavů a v symetrii 3m je možných 8 doménových stavů [8]. Polarizační napětí realizuje pouze jeden z možných doménových stavů.

2.3.1 Morfotropní fázová hranice

PZT keramika se v praktických aplikacích používá v okolí morfotropní fázové hranice stavového diagramu (*obr. 2.2*), to jest ve složení 48-52% PT [8].

Použití polarizované PZT keramiky blízko morfotropní fázové hranice je dáno jejími lepšími vlastnostmi:

- Keramika PZT zde vykazuje výrazně větší piezoelektrické koeficienty.
- Lze jedno složení PZT keramiky stejné fáze užít v širokém rozsahu teplot limitovaném pouze Curieho teplotou fázového přechodu.
- V okolí morfotropní fázové hranice vedle sebe existují dvě fáze, tetragonální a trigonální (*obr. 2.2*), tudíž je zde možných 14 doménových stavů. Více doménových stavů má za následek lepší polarizovatelnost PZT keramiky [7].

2.4 Popis materiálových vlastností polarizované PZT keramiky

Pro PZT keramiky je osa 3 pravoúhlé pravotočivé soustavy souřadnic (viz. kap.: 1.1.2) ztotožněna s kladným směrem spontánní polarizace. Zbylé dvě osy, 1 a 2, kopírují u pravoúhlého vzorku hrany podstavy kolmé na směr polarizace.

Pro piezoelektrické, elastické a dielektrické konstanty je ∞ -četná osa symetrie polarizované PZT keramiky ekvivalentní 6-ti čtené ose symetrie. Z tohoto důvodu se materiálové vlastnosti popisují symetrií bodové grupy 6mm. V grupě 6mm mohou existovat dva polární směry v 6-ti čtené ose symetrie.

Matice piezoelektrických koeficientů polarizované PZT keramiky popsané symetrií 6mm (je převzato z [7]):

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

O materiálových vlastnostech PZT keramiky lze hovořit pouze u makroskopicky velkých vzorků. U mikroskopicky malých vzorků ovlivňují výsledné vlastnosti symetrie dílčích zrn. Tato zrna mají velikosti řádově v mikrometrech.

2.5 Výhody a nevýhody polarizované PZT keramiky

Výhody polarizované PZT keramiky ve srovnání s jinými piezoelektrickými látkami:

- PZT keramika je odolná vůči tlaku oproti krystalickým piezoelektrickým látkám.
- Dosahuje se u ní výrazně vyšších hodnot piezoelektrických koeficientů, než je tomu tak u krystalů.
- Snadná technologie výroby.
- Snadné dosažení požadované rezonanční frekvence.
- Neprodukuje elektromagnetický šum.

- Snadná miniaturizace.
- Nízká cena oproti krystalickým látkám.

Nevýhody polarizované PZT keramiky ve srovnání s jinými piezoelektrickými látkami:

- PZT keramika je poměrně křehká.
- Má velice malý činitel jakosti vzhledem ke krystalickým látkám.
- Použitelnost keramiky je limitována faktory způsobující její depolarizaci, přepolarizaci a ztrátu spontánní polarizace (viz. kap.: 2.2).
- Vlivem polykrystalčnosti materiálu se nedosáhne tak jemných tolerancí piezoelektrických koeficientů jako u krystalických látek.

2.6 Aplikace polarizované PZT keramiky dle plochy hysterézní smyčky

Tvrdá PZT keramika – má úzkou hysterézní smyčku (viz. kap.: 1.2). Tyto keramiky se používají jako rezonátory (například pro ultrazvukové čištění a svařování, zdroje ultrazvuku v lékařství, rozprašovače a inhalátory léků [9]).

Měkká PZT keramika – má širokou hysterézní smyčku, která odpovídá větším dielektrickým ztrátám. Tato keramika má v průměru větší hodnoty piezoelektrických konstant oproti tvrdým polarizovaným PZT keramikám. Tyto typy keramik se potom používají například jako senzory a aktuátory (piezoelektrické motorky a bimorfy [9]).

3. Polarizovaná PZT keramika jako rezonátor

Výlisek polarizované PZT keramiky opatřený elektrodami se nazývá rezonátor. Přivedením střídavého harmonického napětí na rezonátor se piezoelektrický materiál deformuje s frekvencí přiloženého napětí. K výrazně větší mechanické deformaci dochází při rezonančních frekvencích rezonátoru. Každý piezoelektrický rezonátor může kmitat řadou jednoduchých (základních nebo harmonických) rezonančních frekvencí. Dále může kmitat i vzájemně vázanými typy těchto jednoduchých kmitů [10].

3.1 Vybuzené kmity vzorku dané polarizované PZT keramiky

Jednotlivé typy kmitů, kterými může kmitat daný vzorek polarizované PZT keramiky, jsou popsány nenulovými piezoelektrickými koeficienty $d_{i\gamma}$ matice piezoelektrických koeficientů (2.1).

Index i piezoelektrického koeficientu říká, ve kterém směru souřadné soustavy os (*obr. 1.1*) musí být přiváděno na vzorek elektrické napětí. Index γ , určuje rovinu nebo směr kmitání vybuzeného kmitu rezonátoru.

Koeficienty d_{31} a d_{32} jsou si sobě rovny. Stejně tak se rovnají i koeficienty d_{15} a d_{24} (viz. kap.: 1.1.2). Z obou rovností plyne, že se dají vybudit kmity popsané koeficienty d_{31} a d_{15} dvěma různými způsoby.

Piezoelektrický koeficient d_{31} popisuje kmit ve směru 1 a 2 a d_{33} ve směru 3 dle zvolené souřadné soustavy (*obr. 1.1*). Koeficient d_{15} charakterizuje kmit v rovině (2, 3) nebo rovině (1, 3) dle zvolené soustavy souřadnic a směru, ve kterém je přivedeno elektrické napětí.

4. Experimentální metody pro stanovení piezoelektrických koeficientů

1. Statické metody – jejich nevýhodou je, že počáteční podmínky ovlivní měření, což má za následek nepřesnost výsledku. Proto se tyto metody užívají jen pro orientační zjišťování piezoelektrických koeficientů. Přesto mají jednu výhodu a tou je nezávislost na frekvenci budícího elektrického pole piezoelektrického vzorku [7].
 - D33-metr – měří náboj indukovaný na elektrodách vzorku při působení přesně definovanou silou.
 - Piezoskop – měří náboj vzorku, který je zatížen.
 - Hydrostatická metoda – piezoelektrický materiál se podrobí hydrostatickému tlaku, který je všesměrový. Měří se náboj na elektrodách odpovídající hydrostatickému piezoelektrickému koeficientu.
2. Dynamické metody – neuplatňuje se zde takový vliv počátečních podmínek, a tudíž se dosahuje větší přesnosti než u statických metod.
 - Rezonanční měření – pracuje na principu měření velikosti impedance rezonátoru.
 - Laserová interferometrie – je založena na měření menších posunutí, než je polovina vlnové délky laserového světla.

5. Laserová interferometrie

5.1 Princip interferometrie

Interferometr je optický přístroj složený z několika optických soustav. Principem je rozdělení laserového paprsku do dvou optických větví, referenční a sondující. Obě větve se potom opět spojí a pomocí daných optických elementů se zajistí interferenční podmínky výsledné elektromagnetické vlny. Výsledkem je interferenční obrazec nesoucí světelnou informaci o měřené veličině. Tato světelná informace se převádí na elektricky měřitelný signál pomocí fotocitlivého detektoru [1].

5.1.1 Princip interference dvou elektromagnetických vln

Elektromagnetická monochromatická vlna je popsána dvěma ortogonálními vektory, vektorem intenzity elektrického pole a vektorem magnetického pole. Popis chování elektromagnetické vlny se provádí pomocí elektrického pole $\mathbf{E}$, jelikož má větší silové účinky oproti magnetickému poli [11].

Intenzita elektrického pole je definována amplitudou a fází. Při skládání dvou elektromagnetických vln platí princip superpozice (skládání) pro amplitudy intenzit elektrických polí.

Fotocitlivý detektor je schopen zaznamenat světelnou intenzitu I . Pro světelné intenzity dílčích elektromagnetických vln neplatí princip superpozice. Důvodem je vznik interference mezi těmito vlnami.

Interference se nedá vysvětlit paprskovou optikou, jelikož závisí na fázích složených vln [12].

5.1.2 Interferenční rovnice dvou elektromagnetických vlnění o stejné světelné intenzitě

Světelná intenzita I elektromagnetické vlny je dána druhou mocninou amplitudy intenzity elektromagnetického pole. S využitím tohoto vztahu a principu superpozice amplitud intenzit elektrických polí (viz. kap.: 5.1.1) získáme interferenční rovnici [12]. Interferenční rovnice dvou elektromagnetických monochromatických vln o stejné světelné intenzitě I_0 vzájemně posunutých o úhel φ má tvar:

$$I = 2 \cdot I_0 \cdot (1 + \cos \varphi) \quad (5.1)$$

Interference se projevuje tím, že světelná intenzita výsledného vlnění může mít větší nebo menší intenzitu než součet dílčích skládajících se světelných intenzit. Větší hodnoty výsledné intenzity I (5.1) než je součet dílčích intenzit I_0 odpovídají konstruktivní interferenci. Naopak menší hodnoty výsledné intenzity I odpovídají destruktivní interferenci.

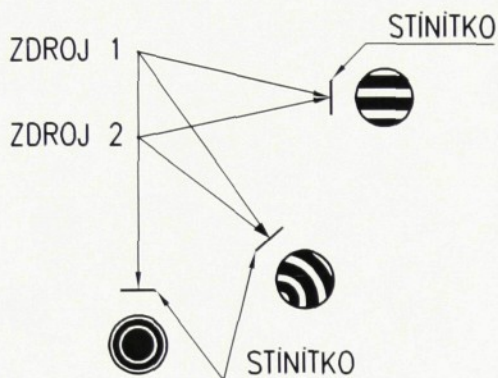
K interferenci dané vztahem (5.1) dochází pouze tehdy, pokud jsou splněny tyto interferenční podmínky:

1. Obě elektromagnetické vlny se šíří ve stejném směru.
2. Vlnoplochy obou elektromagnetických vln se překrývají nebo jsou vůči sobě ve vhodné vzdálenosti.
3. Složky amplitud intenzit elektrických polí skládajících se elektromagnetických vln jsou v jedné rovině.
4. Obě elektromagnetické vlny jsou monochromatické a mají stejnou frekvenci.
5. Je zajištěn vysoký stupeň koherence zdroje obou elektromagnetických vln.
6. Obě elektromagnetické vlny mají stejnou světelnou intenzitu I_0 .

Při splnění těchto interferenčních podmínek plyne z rovnice (5.1) harmonická závislost výsledné světelné intenzity I na fázovém rozdílu φ .

5.1.3 Interferenční obrazce dvou elektromagnetických vlnění

Interference dvou světelných elektromagnetických vln je pozorovatelná na stínítku jako interferenční obrazec. Tvar tohoto obrazce je určen vzájemnou polohou stínítka vůči oběma monochromatickým zdrojům koherentního záření.



Obr. 5.1: Druhy interferenčního obrazce v závislosti na umístění dvou světelných monochromatických koherentních zdrojů vůči stínítku podle [1].

Tmavá místa interferenčního obrazce odpovídají konstruktivní interferenci (viz. kap.: 5.1.2), kdežto světlá místa popisují destruktivní interferenci.

Z obrázku je patrné, že pokud jsou zdroje záření vůči danému stínítku v zákrytu, pozorujeme interferenční soustředné kružnice. Oddalujeme-li oba zdroje od sebe (vůči stínítku), obrazec postupně mění tvar z interferenčních kružnic na interferenční proužky.

Kontrast světlých a tmavých oblastí interferenčního obrazce definuje fyzikální veličinu viditelnost [12]. Největší viditelnost nastane, pokud jsou intenzity světla z obou zdrojů záření sobě rovny.

Z interferenční rovnice (5.1) je možno vyjádřit maximální hodnotu ($I_{\max}$) a minimální hodnotu ($I_{\min}$) výsledné světelné intenzity I pro dané posunutí φ :

$$\varphi = 2 \cdot k \cdot \pi \quad \Rightarrow \quad I = I_{\max} = 4 \cdot I_0 \quad (5.2)$$

$$\varphi = \pi \cdot (1 + 2 \cdot k) \quad \Rightarrow \quad I = I_{\min} = 0 \quad (5.3)$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Maximální hodnota světelné intenzity $I_{\max}$ odpovídá středu světlého místa, hodnota $I_{\min}$ reprezentuje střed tmavého místa v interferenčním obrazci (obr. 5.1).

5.2 Laser

Laser, zesilovač světla stimulovanou emisí, je optický oscilátor složený z optického zesilovače a zpětné vazby. Zesilování světla je na principu stimulované emise záření v aktivním prostředí zesilovače.

Podmínky oscilací laseru jsou splněny pouze pro rezonanční frekvence oscilátoru. Selektce jedné rezonanční frekvence (jednoho módu) je dosaženo rezonančním zesilovačem a také rezonátorem [12].

Laser je zdroj koherentního, monochromatického elektromagnetického vlnění. Vlnová délka jeho záření spadá do viditelné oblasti spektra. Poměrně vysoká intenzita laserového světla je i relativně dobře časově stálá ve stabilním režimu laseru. Výhodou je, že laserové záření většiny laserů je lineárně polarizované.

Jednou z velkých předností laseru je malá divergence (rozbíhavost) jeho paprsku. Ta se téměř zachovává i po několikanásobném odrazu od reflexní vrstvy či průchodem opticky transparentní soustavou.

Všechny tyto vlastnosti laseru splňují požadavky na vhodný světelný zdroj použitelný pro interferometrii (viz. kap.: 5.1.2).

5.3 Polarizace světla

Použití laseru v interferometrii si žádá znalost polarizace světla. Polarizace světla je popsána vektorem intenzity elektrického pole $\mathbf{E}$, jehož koncový bod opisuje v obecném případě, v rovině kolmé na směr šíření elektromagnetického vlnění, elipsu. V krajním případě může elipsa konvergovat k úsečce, potom hovoříme o lineárně polarizovaném světle, nebo je popsána kružnicí, čemuž odpovídá kruhově polarizované světlo.

Kruhově polarizované světlo může nabývat dvou stavů dle typu rotace intenzity elektrického pole. Pravotočivé, pro které platí, že vektor intenzity elektrického pole rotuje ve směru hodinových ručiček, a levotočivé kruhově polarizované světlo s rotací na opačnou stranu.

Interakce dané monochromatické vlny s materiálem závisí na stavu polarizace vlny a vlastnostech materiálu. Této vlastnosti využívá spousta optických elementů.

5.3.1 Odraz a lom polarizované elektromagnetické vlny

Při lomu a odrazu elektromagnetické lineárně polarizované vlny na rozhraní dvou opticky rozdílných prostředí závisí množství intenzity lomeného a odraženého paprsku mimo jiné i na směru polarizace dopadající vlny vzhledem k rovině dopadu [12].

Při odrazu na rozhraní dvou optických prostředí s různým indexem lomu se může změnit stav polarizace. Při kolmém dopadu na kovovém zrcadle zachovává lineárně polarizované světlo svojí polarizaci, kdežto kruhově polarizované světlo mění smysl rotace vektoru intenzity elektromagnetického pole. To znamená, že z pravotočivého kruhově polarizovaného světla se stává levotočivé a naopak.

5.3.2 Optická polarizační zařízení

Optický polarizátor

Optický polarizátor propouští složku polarizace elektromagnetické vlny promítnutou do směru osy propustnosti polarizátoru. Mezi polarizátory patří i polarizační dělič paprsků, nazývaný též jako polarizační hranol. Tento dělič se vyrábí slepením dvou vhodných pravouhlých hranolů. Dle vlastností použitých materiálů jednotlivých hranolů se získá daný typ polarizačního hranolu, který dělí vstupující paprsek do dvou větví s různou polarizací. Například se používá skleněný hranol, kde je v místě lepení jeho dvou částí na straně jednoho z dílčích hranolů nanese reflexní vrstva. Dále se vyrábějí hranoly z anizotropního transparentního materiálu.

Pomocí polarizátoru můžeme získat i z nepolarizovaného elektromagnetického vlnění lineárně polarizované světlo, ovšem na úkor ztráty světelné energie v požadovaném směru.

Vedle polarizačních hranolů existují i nepolarizované hranoly. Ty dělí intenzitu daného paprsku na dvě elektromagnetické vlny stejných vlastností.

Fázové destičky

Fázové destičky jsou vyrobeny z opticky průhledné anizotropní látky, která má dvě optické osy, rychlou a pomalou.

Význačnou charakteristikou fázové destičky je její fázové zpoždění definované pro určitou vlnovou délku [12]. Destička je natočena tak, aby lineární polarizace vstupujícího světla do destičky nebyla rovnoběžná s žádnou z jejích optických os. Vstupující světlo je tak rozděleno do dvou ortogonálních složek. Složka polarizace elektromagnetického vlnění procházející ve směru pomalé osy způsobí změnu fáze této vlny o fázové zpoždění destičky vůči složce polarizace procházející ve směru rychlé osy. Výsledkem je změna stavu polarizace vystupujícího světla z destičky vůči vstupujícímu světlu.

Dle velikosti fázového zpoždění, které je dáno tloušťkou destičky ve směru procházejícího světla, existují různé druhy fázových destiček pro danou vlnovou délku světelného vlnění. Nejčastěji se používají $\lambda/2$ a $\lambda/4$ vlnové destičky.

Optický fázový modulátor

Optický fázový modulátor je založen na stejném principu jako fázová destička s tím rozdílem, že do modulátoru vstupují dva lineární ortogonální stavy polarizací ve směrech optických os modulátoru (rychlé a pomalé osy). Výsledné fázové zpoždění obou vystupujících vlnění z modulátoru vůči sobě navzájem se dá regulovat velikostí přiloženého stejnosměrného elektrického napětí.

5.4 Aplikace interferometrie

- Určení menších posunutí než desetina vlnové délky laseru (určení piezoelektrických konstant tenkých vrstev [13] i obecných tvarů piezoelektrických materiálů).
- Zjišťování elektrooptických vlastností krystalů (například určování Pockelsových koeficientů [14]).
- Určení posunutí větších než je polovina vlnová délka laseru. Používá se při měření hysterézních smyček piezoelektrických materiálů [15].
- Určení tloušťky tenkých vrstev.
- Zjišťování kvality optických ploch.
- Ověřování kolmosti ploch.
- Interferometr lze použít i jako spektrometr.

6. Určení piezoelektrických koeficientů pomocí laserové interferometrie

6.1 Princip určení piezoelektrického posunutí stěny vzorku

Pro určení piezoelektrických koeficientů metodou laserové interferometrie je piezoelektrický vzorek umístěn v sondující optické větvi interferometru (viz. kap.: 5.1) a jako zdroj záření je použit laser (viz. kap.: 5.2).

Seřízením interferometru se zajistí splnění interferenčních podmínek sondující a referenční větve (viz. kap.: 5.1.2). Výsledkem je potom interferenční obrazec. Jako nejvýhodnější se pro měření ukazují být interferenční soustředné kružnice (*obr. 5.1*) z důvodu gaussovské povahy světla a velikosti aktivní plochy použitého detektoru.

Fotocitlivý detektor převádí intenzitu světla na elektrický signál a měřicí technika provede jeho vyhodnocení.

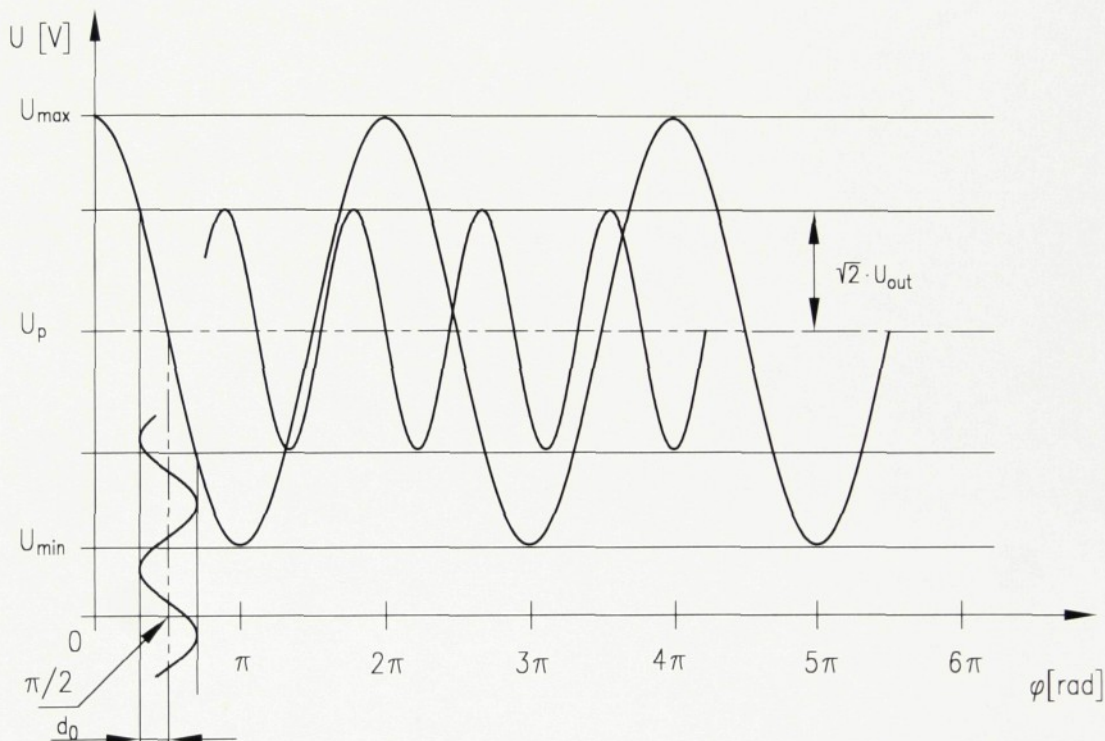
Světelné intenzity v interferenční rovnici (5.1) lze vyjádřit v elektrických hodnotách (napětích). Hodnotě I odpovídá napětí U ($I_{\max}$ (5.2) $\sim U_{\max}$, $I_{\min}$ (5.3) $\sim U_{\min}$). V obecném případě nemusí být minimální hodnota napětí $U_{\min}$ nulová jako v případě intenzity $I_{\min}$ (5.3), což je především způsobeno měřicí technikou a světelnými šumy měřeného signálu. Interferenční rovnice vyjádřená pomocí elektrických napětí má tvar:

$$U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \cdot \cos \varphi + \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} \quad (6.1)$$

První člen rovnice popisuje interferenci a druhý nastavení pracovního bodu interferometru. Rozdíl napětí ($U_{\max} - U_{\min}$) reprezentuje citlivost interferenčního obrazce. Tato citlivost je největší v případě interferenčního obrazce soustředných kružnic.

Určování piezoelektrických koeficientů metodou laserové interferometrie je založeno na určování menších posunutí, než je desetina vlnové délky laserového světla. Přiložené harmonické napětí na měřený vzorek vyvolá jeho deformaci (viz. kap.: 1.1.2), která se projevuje posuvem stěn piezoelektrického materiálu v sondující větvi

interferometru. Kmity stěny vzorku, na který dopadá laserové světlo, způsobí změnu fázového rozdílu elektromagnetické vlny sondující větve vůči referenční větvi interferometru. Amplituda změn fázového rozdílu je úměrná amplitudě mechanického posuvu stěny piezoelektrického vzorku d_0 . Posuv s amplitudou d_0 je poté transformován na změnu intenzity světla a poté měřen. Měřené hodnotě napětí odpovídá elektrický signál s amplitudou $2^{1/2}U_{\text{out}}$.



Obr. 6.1: Graf průběhu napětí U v závislosti na fázovém rozdílu φ dle (6.1) a naznačení transformace časového signálu s amplitudou d_0 (úměrného φ) na elektricky měřitelný signál s amplitudou $2^{1/2}U_{\text{out}}$. Hodnota napětí U_p odpovídá pracovnímu bodu interferometru. Napětí U_{max} a U_{min} popisují maximální a minimální interferenci interferenčního obrazce.

Vlastní měření malých posunutí pomocí metody laserové interferometrie se provádí v pracovním bodě interferometru.

6.2 Pracovní bod a kalibrace interferometru

Pracovní bod interferometru

Ideální nastavení pracovního bodu interferometru je v oblasti, kde je harmonická funkce (*obr. 6.1*) co nejvíce strmá a zároveň i téměř lineární.

Téměř lineární oblast je výhodná hned ze dvou důvodů:

1. Malá změna měřeného fázového rozdílu φ (úměrná d_0) vyvolá poměrně velkou změnu výstupního napětí U_{out} (dosahuje se tak velké citlivosti při měření).
2. Dosáhne se tak téměř lineární transformace fázového posunutí φ na měřitelnou hodnotu napětí U_{out} .

Ideální nastavení interference je v inflexním bodě harmonické funkce (*obr. 6.1*). Tomuto bodu U_p odpovídá příslušné posunutí φ :

$$\varphi = \frac{\pi \cdot (2 \cdot k + 1)}{2} \quad \Rightarrow \quad U_p = \frac{U_{\text{max}} + U_{\text{min}}}{2} \quad (6.2)$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Nastavení pracovního bodu interferometru je založeno na principu fázového posuvu obou dvou optických větví interferometru vůči sobě navzájem. Pracovní bod lze nastavit více způsoby. Například buď pomocí piezoelektrického aktuátoru, nebo fázovým modulátorem (viz. kap.: 5.3.2).

Piezoelektrický aktuátor se umísťuje do referenční větve interferometru. Je napájen stejnosměrných napětím, které způsobuje posuv jeho čelní stěny ve směru dopadajícího paprsku, tím se mění fázový rozdíl referenční větve vůči sondující větvi interferometru.

Kalibrace interferometru

Před vlastním měřením je nutno provést kalibraci interferometru. Ta se dá realizovat hned dvojím způsobem [15]:

1. Určením rozdílu naměřených hodnot napětí U_{max} a U_{min} (*obr. 6.1*).

2. Známým dostatečně malým posuvem vyvolaným v sondující větvi interferometru a změřením jeho příslušného napětí U_{out} .

6.3 Výpočet piezoelektrických koeficientů

Odvození vztahu výpočtu piezoelektrických koeficientů z výsledků laserové interferometrie vychází z vyjádření amplitudy posunutí stěny vzorku d_0 vyvolané piezoelektrickým jevem. Posunutí d_0 souvisí s rozdílem fází φ (5.1).

$$\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_0}{\lambda} \quad (6.3)$$

Posunutí d_0 se dá vyjádřit po matematických úpravách z prvního členu vzorce (6.1):

$$d_0 = \frac{U_{out}}{(U_{max} - U_{min})} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2}} \quad (6.4)$$

Výpočet piezoelektrického koeficientu pro metodu laserové interferometrie vychází ze vztahu stavové rovnice (1.1) dle [1]:

$$d_{iy} = \frac{d_0}{U_A} \cdot \frac{t}{x} \quad (6.5)$$

kde U_A je amplituda harmonického napětí, kterým je napájen vzorek
 t je délka vzorku ve směru přiloženého elektrického pole
 x je aktivní délka ve směru měřené deformace vzorku.

Aktivní délka x je dána délkou volně kmitající části vzorku ve směru dopadajícího laserového záření. Tato délka závisí na uchycení piezoelektrického vzorku.

Výpočet piezoelektrického koeficientu z naměřených a známých hodnot obdržíme dosazením vztahu (6.4) do výrazu (6.5):

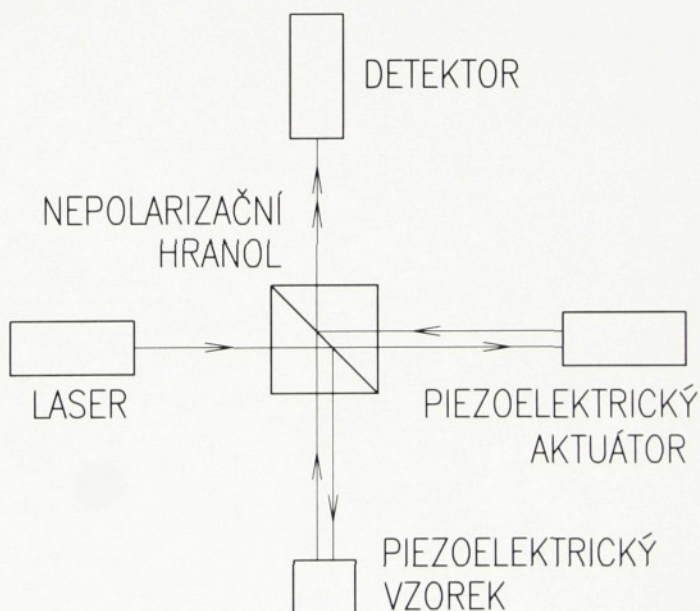
$$d_{iy} = \frac{U_{out}}{(U_{max} - U_{min})} \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{t}{x \cdot U_A} \quad (6.6)$$

7. Typy laserových interferometrů pro měření piezoelektrických koeficientů

7.1 Jednopaprskový Michelsonův interferometr

Jedná se o nejjednodušší a nejpoužívanější typ interferometru pro určení piezoelektrických koeficientů.

Laserový paprsek je rozdělen nepolarizovaným děličem do dvou optických větví (viz. kap.: 5.1). V referenční větvi je umístěn piezoelektrický aktuátor (viz. kap.: 6.2). V sondující větvi je umístěn měřený piezoelektrický vzorek kmitající ve směru dopadající laserové vlny.



Obr. 7.1: Schéma laserového jednopaprskového Michelsonova interferometru pro určení piezoelektrických koeficientů dle [12].

Nevýhodou tohoto interferometru je, že si klade podmínky na uchycení piezoelektrického vzorku. Měří totiž jak kmity vzorku způsobené piezoelektrickým jevem,

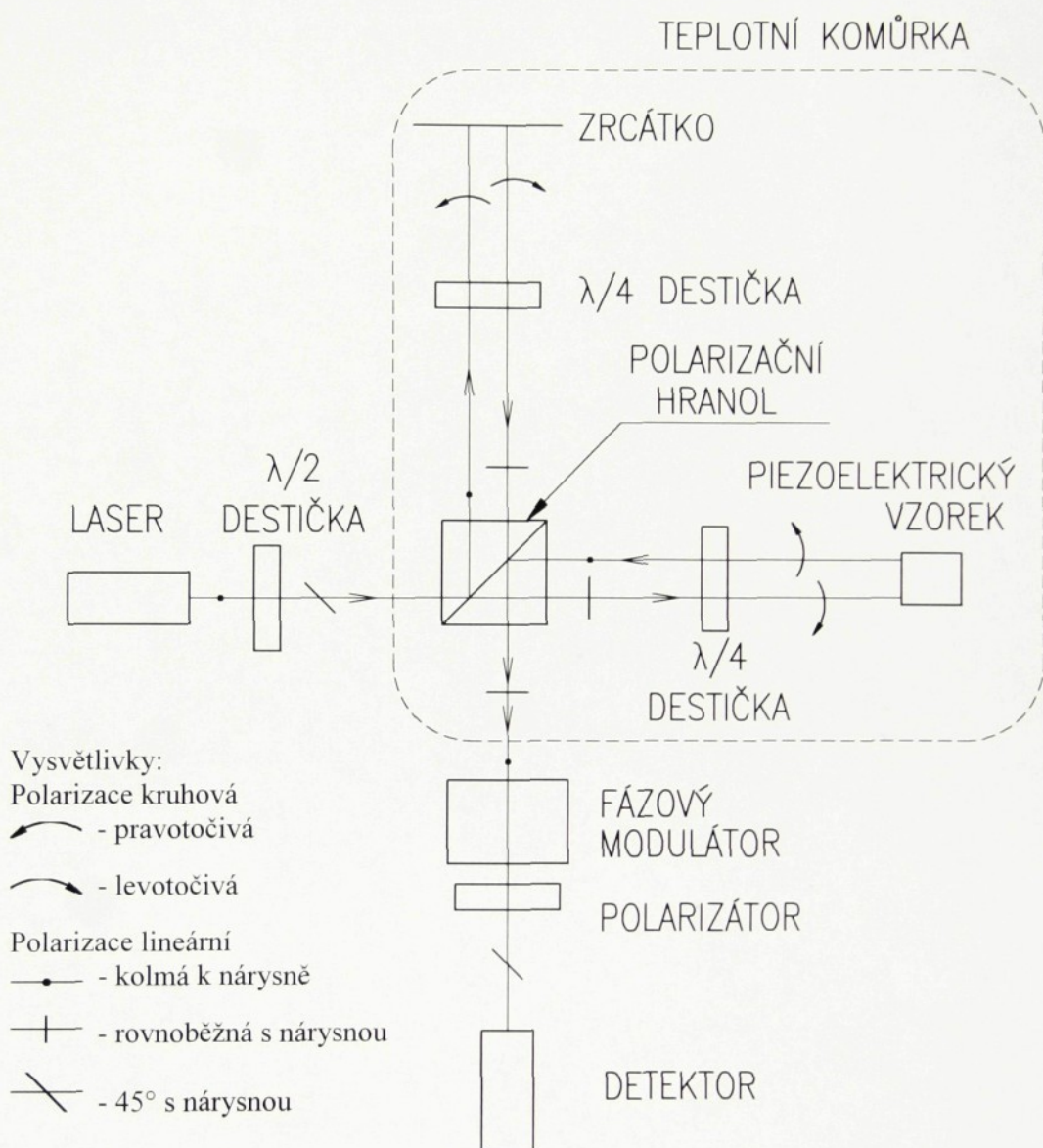
tak i mechanické kmity vzorku způsobené jeho uchycením (například u lepeného vzorku). Tato nevýhoda se odstraní, pokud se vzorek mechanicky pevně zajistí proti parazitním kmitům.

7.2 Mikrointerferometr

Mikrointerferometr je modifikovaný jednopaprskový Michelsonův interferometr (viz. kap.: 7.1), byl navržen RNDr Šulcem pro určení piezoelektrických koeficientů v širokém rozsahu teplot pomocí daného kryostatu [11].

Pokud by byl měřený vzorek umístěn v teplotní komůrce kryostatu odděleně od interferometru, výsledek měřeného posuvu způsobeným piezoelektrickým jevem by byl ovlivněn kmity kryostatu. Kmity daného kryostatu jsou výrazné a neharmonické, takže kmity piezoelektrického vzorku jsou proti nim zanedbatelné.

Konstrukce nového interferometru vyšla z úvahy, že na přesnost interferenčního měření má dominantní vliv pouze oblast od začátku rozdělení laserového paprsku až po jeho následné spojení. Vnější kmity laseru, detektoru a dalších optických elementů vně interferometru nemají vliv na výslednou interferenci [11]. Tyto myšlenky vedly k umístění celého interferometru do prostoru kryostatu.



Obr. 7.2: Schéma laserového modifikovaného jednopaprskového Michelsonova interferometru (mikrointerferometru) pro určení piezoelektrických koeficientů v širokém rozsahu teplot pomocí kryostatu dle [1].

Vlivem miniaturizace celého interferometru do prostoru kryostatu byl zvolen pro nastavení pracovního bodu interferometru fázový modulátor (viz. kap.: 5.3.2), který je umístěn mimo oblast teplotní komůrky, jelikož je teplotně závislý.

Vzniklý mikroiinterferometr [1] využívá polarizaci laserového světla (viz. kap.: 5.3). Byl zvolen zatím jako nejvýhodnější pro měření teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů.

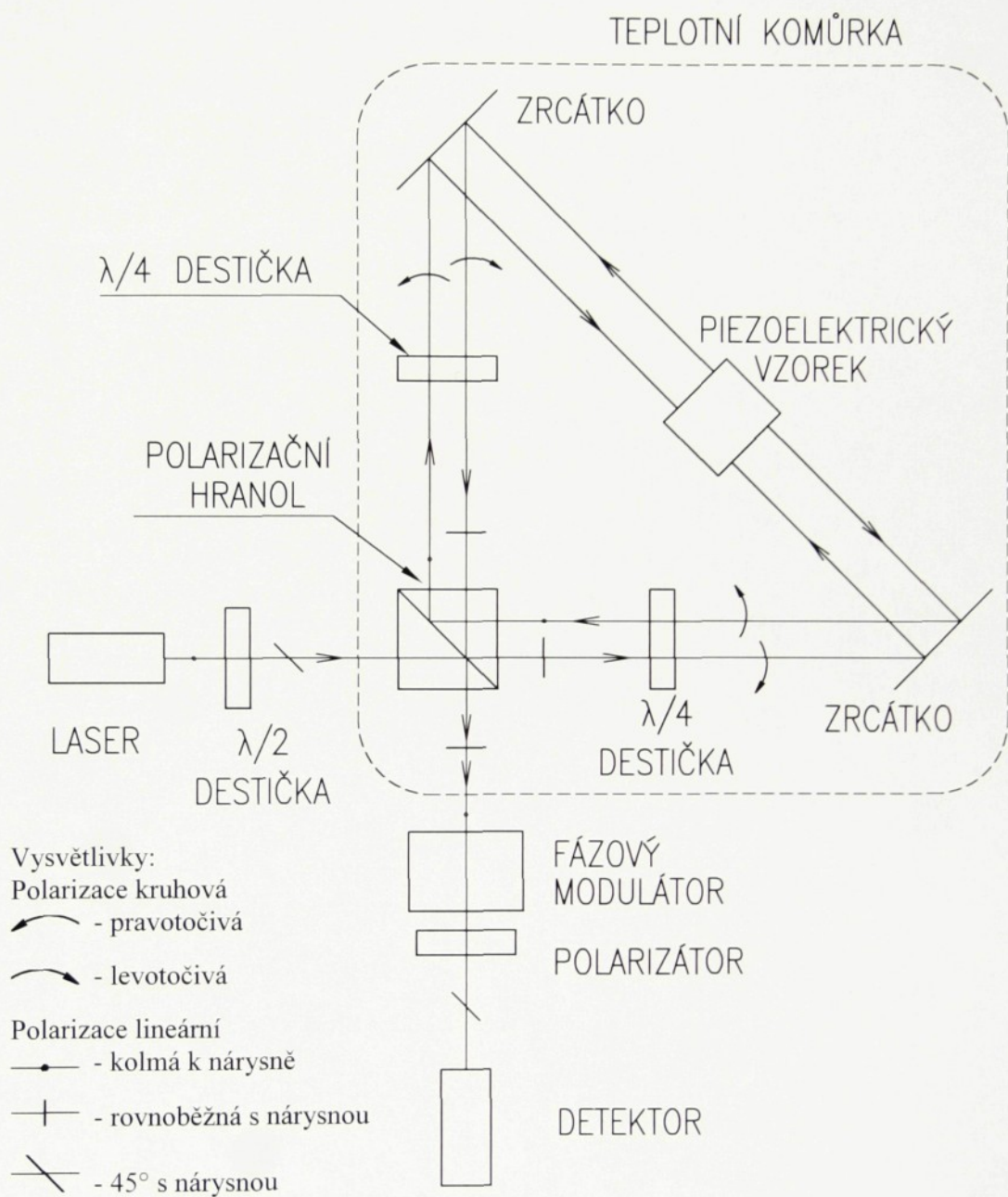
Nevýhody mikroiinterferometru:

- Vlivem miniaturizace je méně snadné seřízení interferometru oproti nemodifikovanému jednopaprskovému interferometru.
- Na rozhraní dvou opticky transparentních ploch dochází zhruba k 4% odrazu světelné vlny. Velké množství optických komponent použitých v sestavě interferometru má za následek pokles světelné intenzity výsledné interferenční vlny nesoucí dobrou informaci o měřeném fázovém rozdílu φ . Vznikají tak nežádoucí šумы vlivem parazitních odrazů, které se v sestavě kumulují. Snížení parazitních odrazů se dá potlačit aplikováním antireflexních vrstev daných komponent [1]. Antireflexní vrstvy sníží odrazivost daných ploch zhruba na 2,5% [15].

7.3 Deltamikroiinterferometr

Deltamikroiinterferometr byl navržen RNDr. M. Šulcem pro určení piezoelektrických koeficientů v širokém rozsahu teplot pomocí daného kryostatu [1].

Deltamikroiinterferometr je dvoupaprskový interferometr, u kterého se dělí laserový paprsek na referenční a sondující větev. Paprsek v sondující větvi interferometru dopadá na čelní stranu vzorku, odráží se pomocí optických soustav a opět dopadá na piezoelektrický vzorek, ale z druhé strany. Poté interferuje s referenční částí paprsku po projití obou paprsků polarizátorem.



Obr. 7.3: Schéma dvoupraskového mikroiinterferometru (deltamikroiinterferometru) pro určení piezoelektrických koeficientů v širokém rozsahu teplot pomocí kryostatu.

Dvoupraskový interferometr odstraňuje nevýhodu jednoppraskového interferometru - parazitní vibrace vzorku (viz. kap.: 7.1).

Nevýhody deltamikrointerferometru a jejich možné eliminování:

- Paprsek dopadající na čelní stranu vzorku dopadne na jeho odvrácenou část za dobu danou rychlostí šíření elektromagnetického vlnění [16]. V této době vzorek stále kmitá konečnou frekvencí budícího napětí. Tato chyba je minimální pouze u interferometrů s co nejkratší délkou sondující větve a snižuje se s klesající frekvencí nucených kmitů vzorku.
- Vlivem velkého množství optických komponent se justace paprsků stává složitější.
- Snižování výsledné světelné intenzity vlivem parazitních odrazů (viz. kap.: 7.2).

PRAKTICKÁ ČÁST

8. Sestava mikrointerferometru

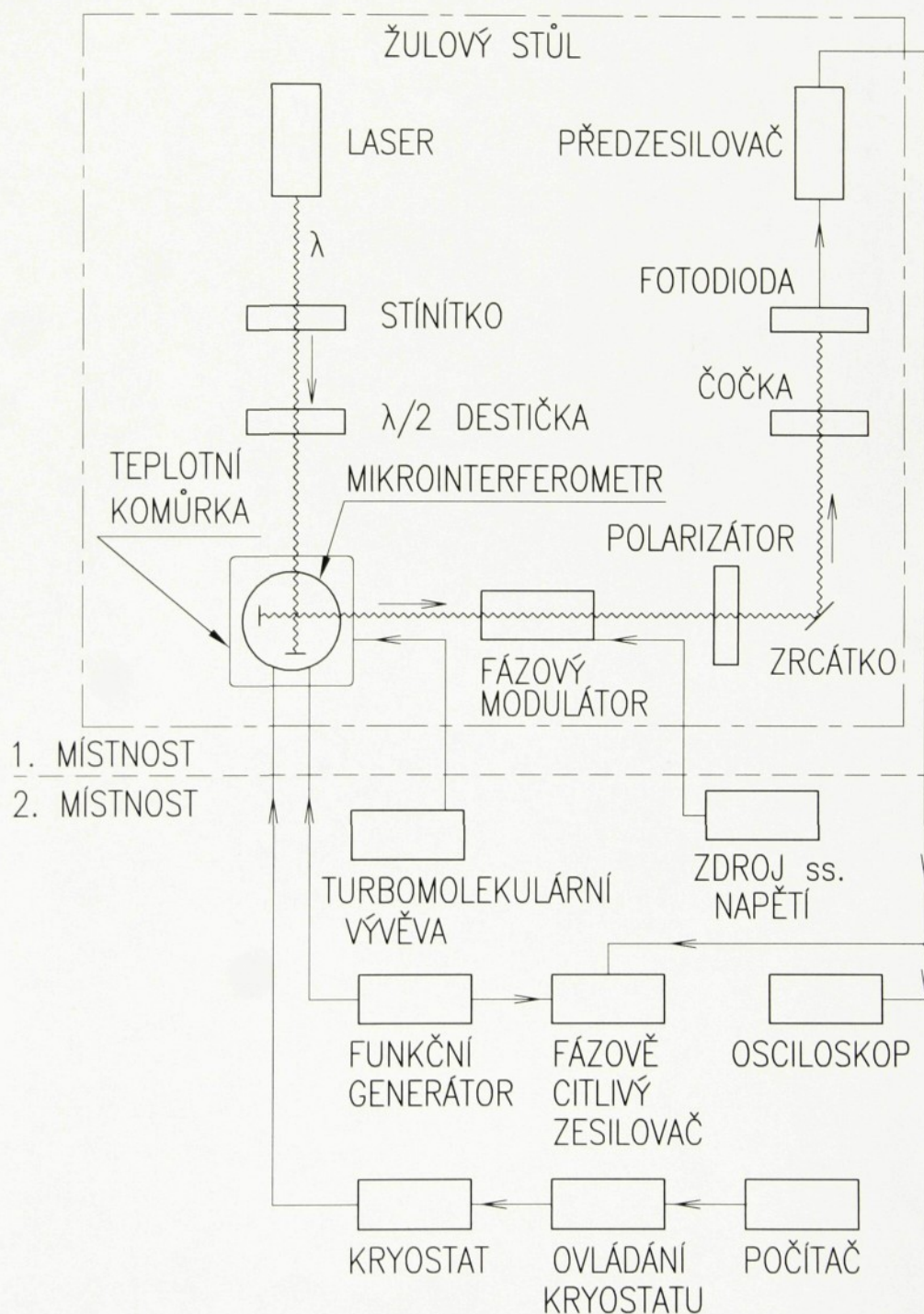
Pro určení teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů byl zvolen mikrointerferometr (viz. kap.: 7.2).

Interferometr a jeho přídatné komponenty jsou umístěny na masivním žulovém stole. Tento stůl odstínjuje do určité míry nežádoucí vibrace způsobené okolními vlivy, jelikož interferometr je na ně velice citlivý.

Mikrointerferometr je umístěn v zatemněné místnosti (místnost 1 (*obr. 8.1*)), aby se odrušily okolní světelné šumy a detekovala se s co největší přesností světelná intenzita měřeného interferenčního laserového signálu.

Měřicí přístroje jsou umístěny ve vedlejší místnosti (místnost 2) laboratoře, aby jejich vibrace nezpůsobovaly nežádoucí kmity interferometru a aby usnadňovaly obsluhu měření a řízení celé sestavy.

Obr. 8.1: Schéma sestavení a zapojení mikroiinterferometru pro určení piezoelektrických koeficientů v širokém teplotním rozsahu pomocí kryostatu s celým měřicím a řídicím elektronickým aparátem.



8.1 Optické komponenty sestavy mikroiinterferometru (*obr.8.1*) a jejich funkce

Laser

Jedná se o stabilizovaný lineárně polarizovaný He-Ne laser Coherent model 200. Jeho jednomódový výstup má vlnovou délku 632,8nm, která spadá do červené oblasti viditelného frekvenčního spektra. Stabilizace vlnové délky laseru je zajištěna tepelně pomocí zpětné vazby, která udržuje přesnou vzdálenost zrcadel rezonátoru laseru. Stabilita intenzity laserového světla je lepší nežli 0,1% a jeho výkon je 0,7mW. Polarizační poměr lineárně polarizovaného světla daného laseru činí 1000:1 [1].

Laser je nastaven tak, že je jeho polarizační rovina kolmá na podložku žulového stolu.

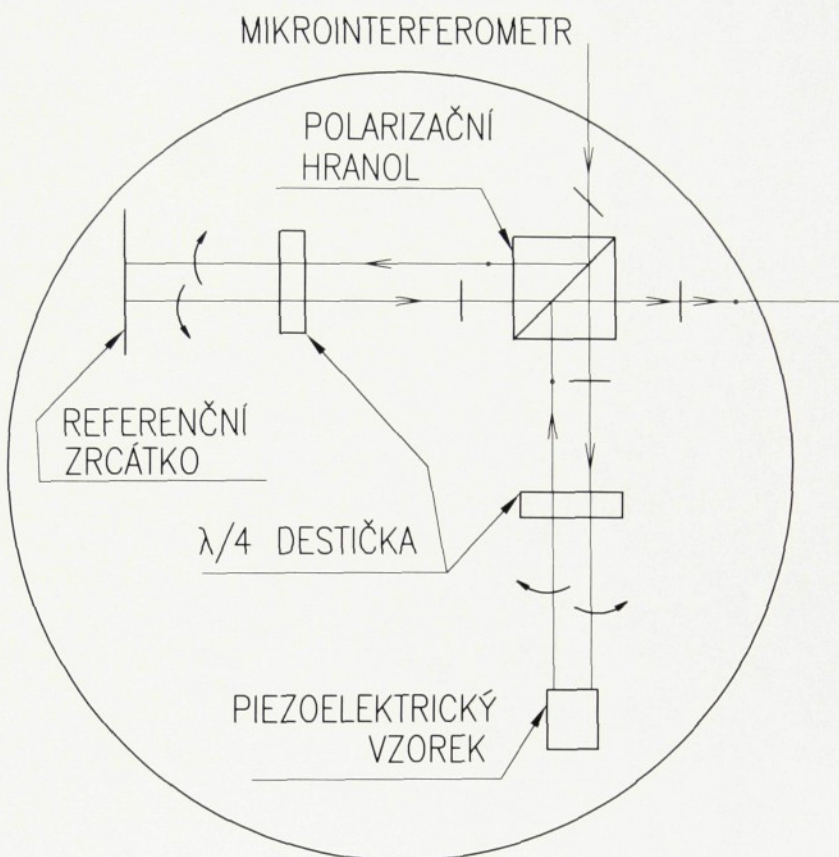
Stínítko

Na plochách optických soustav vznikají nežádoucí odrazy, které by mohly zapříčinit nestabilitu laseru. Stínítko s malým otvorem uprostřed slouží k odstínění těchto nežádoucích paprsků šířících se zpět do laserového zesilovače mimo osu vystupujícího světla z laseru. Nežádoucí paprsky, které by se dostaly zpět do aktivní oblasti laseru, by způsobily jeho nestabilitu.

Vhodným justováním a mírným natočením jednotlivých opticky transparentních soustav se dá zajistit, aby parazitní paprsky neležely přímo v ose vystupujícího záření z laseru.

Půlvlnová fázová destička

Půlvlnová fázová destička má fázové zpoždění 180° (viz. kap.: 5.3.2). Byla nastavená tak, aby její rychlá osa svírala úhel $22,5^\circ$ s rovinou polarizace vstupujícího laserového záření do destičky. Tato realizace destičky má za následek sklopení polarizační roviny laserového světla o úhel 45° po průchodu destičkou.



Obr. 8.2: Detailní schéma Mikrointerferometru (obr. 7.2) ze sestavy (Obr. 8.1) připevněného na mosazné kruhové destičce.

Polarizační dělič paprsku

Jako polarizační dělič paprsků byl použit skleněný optický hranol s reflexní vrstvou (viz. kap.: 3.2). Tento dělič paprsků rozděljuje danou laserovou vlnu (obr. 8.2) na dvě lineárně polarizované vzájemně ortogonální elektromagnetické vlny o stejné světelné intenzitě.

Čtvrtvlnová fázová destička

Čtvrtvlnová fázová destička má fázové zpoždění 90° (viz. kap.: 5.3.2). Její rychlá osa svírá úhel 45° s rovinou polarizace vstupujícího laserového záření. Takto nastavená destička mění lineárně polarizované světlo na levotočivé kruhově polarizované světlo. Naopak pravotočivé kruhově polarizované světlo se změní po průchodu destičkou na lineárně polarizované.

Destička je použita proto, aby se odražené laserové světlo nešířilo v ose příchozího paprsku zpět do laserového zesilovače[11].

Piezoelektrický vzorek se zrcátkem a referenční zrcátko

V sondující větvi je umístěn piezoelektrický vzorek (*obr. 8.2*), který může být opatřen zrcátkem, nebo napařenou dielektrickou reflexní vrstvou. V referenční větvi je nalepené zlaté referenční zrcátko na mosaznou kuličku, kterou lze v určitých mezích natáčet podle 3 os.

Pohyb zrcátka v referenční větvi umožňuje seřízení interferometru (viz. kap.: 5.3.2) tak, aby paprsky vycházely z polarizačního děliče v jednom bodě a dále se šířily v jedné přímce. Výsledné výstupní vlnění je složeno ze dvou ortogonálních polarizací, tudíž se nepozoruje interference (viz. kap.: 5.1.2).

Optický fázový modulátor

Fázový modulátor (viz. kap.: 5.3.2) je zkonstruován z krystalu LiNbO_3 (o délce 36mm, šířce 2mm a výšce 3mm), který využívá Pockelsova jevu [12]. Na krystal je přivedeno stejnosměrné napětí na plochy definované jeho délkou a výškou, tedy ve směru optické osy krystalu.

Principem Pockelsova jevu je, že rychlosti šíření vlnění v daných směrech přímoúměrně závisí na velikosti přiloženého elektrického pole. Pro nastavení pracovního bodu (viz. kap.: 6.2) je tedy nutné, aby do modulátoru vstupovaly dvě ortogonální polarizace paprsků z referenční a sondující větve interferometru. K dosažení změny fázového posuvu obou větví interferometru o úhel 180° odpovídá změna napájecího stejnosměrného napětí o 165V [1].

Optický polarizátor

Osa propustnosti optického polarizátoru (viz. kap.: 5.3.2) je nastavena tak, že svírá úhel 45° s oběma ortogonálními polarizacemi vycházejícími z fázového modulátoru. Polarizátor propustí pouze složky obou polarizací promítnuté do jeho polarizační roviny. Toto uspořádání má za následek vznik interference dvou vlnění o stejné světelné intenzitě světla.

Zrcátko a čočka

Zrcátko nastavuje požadovaný směr paprsku a čočka (rozptylka) rozšiřuje interferenční obrazec.

Antireflexní vrstvy daných optických soustav

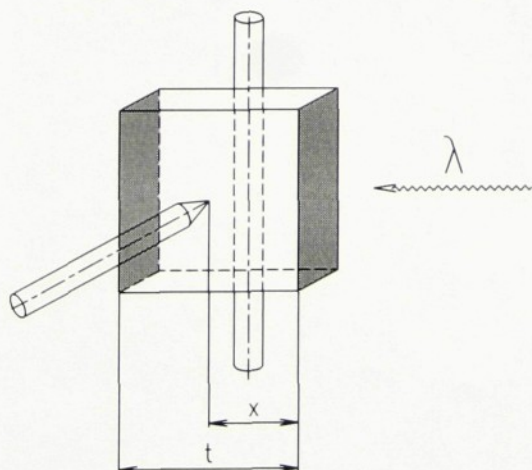
Veškeré povrchy transparentních optických soustav (kromě krystalu LiNbO_3) jsou pokryty antireflexními vrstvami, které minimalizují procento parazitních odrazů (viz. kap.: 7.2). Parazitní odrazy se podílejí na výsledném šumu interferenčního obrazce a mohou způsobit i nestabilitu laseru.

8.2 Uchycení vzorků v mikroiinterferometru (*obr. 8.2*)

Možné uchycení vzorků v prostoru interferometru je doposud dvojího druhu. Vzorek je možno buď nalepit vhodným lepidlem na danou podložku, nebo sevřít mezi dvě čelisti držáčku.

Vzhledem k měřeným kmitům a tvaru vzorku byl pro měření zvolen mechanický držáček, který silou upne mezi svá dvě ramena daný vzorek. Držáček je vyroben z mosazi. Z jedné strany držáčku je vodivý železný váleček, který dosedá na jednu stěnu vzorku. V druhém pohyblivém rameni je šroub zakončený nevodivým výměnným hrotem.

Vzorky byly uchycovány tak, aby laserové světlo dopadalo kolmo ve směru měřeného kmitu (viz. kap.: 3.1).



Obr. 8.3: Uchycení piezoelektrického vzorku tvaru kvádrů v držáčku mikroiinterferometru. Délka x je aktivní délka (viz. kap.: 6.3) vzorku ve směru dopadající laserové vlny o vlnové délce λ . Délka ve směru přiloženého elektrického pole je označena t .

Výhody tohoto držáčku vzhledem k uchycení vzorku pomocí lepení.

- Uchycení vzorku je v co nejméně bodech zaručující stabilní polohu rezonátoru při vibracích kryostatu.
- Odpadají problémy s parazitními kmity způsobené elasticitou lepidla lepených vzorků.
- Snadná manipulace se vzorky vhodných tvarů, lze měřit i vzorky pro určení piezoelektrického koeficientu d_{15} .
- Upnutí je jednoduché a rychlé.

Nevýhody držáčku

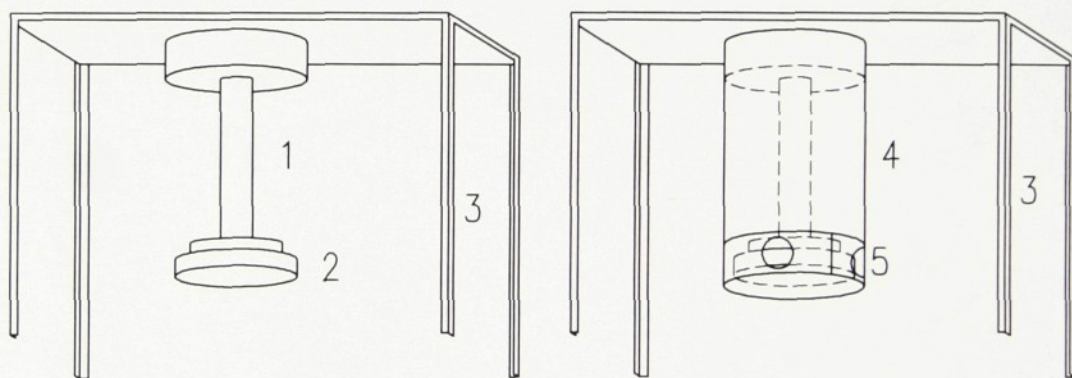
- V sestavě mikroiinterferometru je pro měření a výpočet užitečná pouze aktivní délka vzorku (*obr. 8.3*) ve směru měřeného kmitu.
- Pokud se vzorek správně neutáhne, může dojít při vibracích kryostatu k jeho povolení a následné ztrátě interferenčního obrazce.
- Vodivý váleček způsobí zkrat vzorku, pokud jsou při měření obě jeho elektrody v dotyku s válečkem.
- Hrot z umělé hmoty se při utahnutí deformuje. Dochází tak k nepřesnému určení aktivní délky piezoelektrického vzorku (viz. kap.: 8.3), jelikož se tato délka liší na straně válečku vůči délce na straně hrotu, a tudíž nelze přesně stanovit jaká délka kmitá.

8.3 Teplotní komůrka kryostatu (obr.8.1)

Komponenty mikrointerferometru jsou pevně připevněny na masivní mosaznou kruhovou destičku (obr. 8.2) o průměru 5cm. Pevné připevnění je z důvodu zaručení stability při vibracích kryostatu.

Kruhová destička se uchycuje na rameno kryostatu (obr. 8.4). Tento celek se poté uzavře teplotní komůrkou kryostatu z důvodu možného vytvoření vakua pro měření daných teplotních závislostí.

Teplotní komůrka je uvnitř válcového tvaru s průměrem 6,5cm. Uvnitř teplotní komůrky jsou dvě teplotní čidla. Čidlo 1 je umístěno v horní části ramene kryostatu. Čidlo 2 je v dolní části teplotní komůrky, a snímá tak aktuální teplotu piezoelektrického vzorku.



Obr. 8.4:

- a) Uchycení mosazné kruhové destičky s mikrointerferometrem na rameno kryostatu,
- b) teplotní komůrka kryostatu.

Vysvětlivky:

- 1 Rameno kryostatu
- 2 Mosazná destička s mikrointerferometrem
- 3 Konstrukce pro uchycení ramene kryostatu umístěná na žulovém stole
- 4 Teplotní komůrka kryostatu
- 5 Okénka, kterými vchází a vychází laserové světlo z mikrointerferometru

8.4 Měřicí, řídicí a přídavný aparát mikrointerferometru (*obr. 8.1*)

Turbomolekulární vývěva

Turbomolekulární vývěva firmy TURBOTRONIK NT 120 je součástí přístroje LEYBOVAC PT 150/4 firmy LEYBOLD-HERAEUS. Vývěvu je možno propojit speciální hadicí s uzavřenou teplotní komůrkou (*obr. 8.4*), a vytvořit tak v komůrce požadované vakuum. Měření vakua je zajištěno měřicím přístrojem PENNINGVAC PM 410, který udává velikost tlaku v evakuovaném prostoru komůrky. Za pomoci turbomolekulární vývěvy, která musí být chlazena vodou, se vytvoří v teplotní komůrce kryostatu požadované vakuum.

Kryostat a jeho ovládání

Kryostat slouží k dosažení požadované teploty v evakuovaném prostoru teplotní komůrky. Jedná se o typ Oxford s heliovým médiem, které proudí v uzavřeném cyklu. Kryostat je řízen pomocí přístroje Oxford Cryodrive 1.5, který může ovládat i počítač. Pomocí kryostatu lze dosáhnout teplot v rozsahu 11K-330K s přesností 0,1K.

Kryostat obsahuje pro pohánění hélia kompresory a pumpy, které jsou zdrojem značných vibrací s frekvencí řádově jednotek Hertz [15].

Chlazení kryostatu je zajištěno vodou.

Funkční generátor

Slouží k vybuzení nucených kmitů vzorku harmonickým napětím, které je přivedeno přímo do teplotní komůrky kryostatu. Pro tento účel je použit digitální funkční generátor od firmy Hewlett Packard typ 33120A. Frekvenční rozsah tohoto přístroje je od 1mHz do 15MHz. Napěťový rozsah hodnot napětí U_A je od 0,1V až do 10V.

Vysokonapěťový zdroj

Přivádí elektrické napětí na fázový modulátor a tím podle velikosti napětí nastavuje pracovní bod interferometru (viz. kap.: 5.3.2). Jedná se o zdroj stejnosměrného napětí Stanford Research SR830, dodaný firmou Physik Instrument. Jeho napěťový rozsah je od 1V až do 1000V.

Fotodioda a předzesilovač signálu

Jako fotocitlivý detektor byla použita fotodioda, která převádí intenzitu světla na měřitelnou veličinu, elektrický proud.

Použitá fotodioda byla zkonstruována před několika lety v rámci diplomové práce. Fotodioda je napájena dvěma bateriemi o napětí 9V a její součástí je předzesilovač umožňující nastavení zesílení a offsetu signálu. Offset slouží k nastavení nulové polohy napětí, která odpovídá světlem neozářené fotodiodě.

Předzesilovač převádí a zesiluje proud z fotodiody na elektrické napětí. Daný předzesilovač je frekvenčně nezávislý do 20kHz a jeho zesílení se dá regulovat v určitém rozsahu.

Při měření musí na aktivní fotocitlivou plochu diody, o ploše 1x1mm, dopadat maximálně jedna hranice světlé a tmavé oblasti interferenčního obrazce. Proto je vhodné rozšíření interferenčního obrazce rozptylkou (viz. kap.: 8.1). Zároveň tak dojde k vhodnému snížení světelné intenzity, jelikož z konstrukčních důvodů pro přesné měření nesmí přesáhnout rozdíl ($U_{\max} - U_{\min}$) hodnotu 5V.

Osciloskop

V sestavě je použit digitální osciloskop Hewlett Packard typ 54610B, který zobrazuje průběh napětí z předzesilovače fotodiody. S jeho pomocí se odečítají hodnoty maximálního a minimálního elektrického napětí U (viz. kap.: 6.1) a kontroluje se nastavení pracovního bodu interferometru (viz. kap.: 6.2).

Lock-in

Lock-in slouží pro měření požadované hodnoty, která je úměrná změně intenzity světla nesoucí informaci o fázovém posuvu vzniklém vlivem piezoelektrických kmitů vzorku. Potřebnou informaci dokáže separovat i ze zašumělého signálu. Pracuje na principu fázově citlivého zesilovače, a tudíž dokáže identifikovat i signály, které jsou 1000 krát slabší než šum [1]. Přístroj pracuje do frekvencí 102kHz.

Lock-in má dva vstupy, jeden je referenční a druhý slouží pro signál z předzesilovače fotodiody. Na referenční vstup se přivádí budící signál z generátoru, který se poté normuje. Přístroj provede součet obou těchto signálů. Střídavá složka o součtové frekvenci se odfiltruje. Stejn směrná složka, úměrná amplitudě signálu z fotodiody

se stejnou frekvencí jakou má referenční vstup, nese informaci o měřeném piezoelektrickém posuvu stěny piezoelektrického vzorku. Na displeji přístroje lze odečíst efektivní hodnotu napětí U_{out} (viz. kap.: 6.1).

Počítačové řízení měření

V současné době se pracuje na celkové automatizaci ovládání jednotlivých přístrojů a odečítání potřebných dat pomocí počítače. Prozatím funguje pouze počítačové řízení kryostatu.

9. Vzorky polarizované PZT keramiky

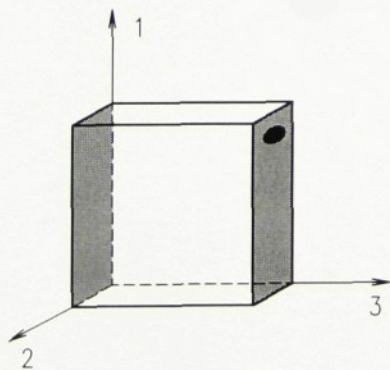
Pro měření piezoelektrických koeficientů laserovou intrferometrií byly určeny vzorky z polarizované PZT keramiky, dodané firmou Piezokeramika s.r.o.. Tato firma sídlí v Libřicích a je součástí firmy American Piezo Ceramics International (APC).

Pro měření byly poskytnuty čtyři druhy polarizovaných vzorků PZT keramiky typového označení APC 840, APC 850, APC 856 a APC 880, které se liší svým složením. Složení jednotlivých typů keramik výrobce neudává. Od výrobce byla k dispozici pouze tabulka hodnot z katalogu [17], ze které byly vybrány potřebné údaje pro tuto práci.

Tabulka 9.1: Tabulka některých hodnot udávaných firmou Piezokeramika pro dané vzorky

	Typy PZT keramik dle složení			
Vlastnosti	APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
Θ_C [°C]	325	360	150	310
d_{33} [pC/N]	290	400	620	215
$-d_{31}$ [pC/N]	125	175	260	95
d_{15} [pC/N]	480	590	710	330

Všechny vzorky jsou stejného tvaru kvádru o velikosti 2 x 5 x 5mm. Každý vzorek je opatřen dvěma elektrodami na stěnách kolmých na směr polarizace.



Obr. 9.1.: Tvar daných vzorků polarizované PZT keramiky v pravotočivé soustavě souřadnic (1, 2, 3).

Vysvětlivky:



Plochy elektrod

- Kladný směr polarizace, který je vyznačen šipkou (→)

Od každého druhu PZT keramiky byly k dispozici 2 kusy ze stejné výrobní série. Jeden kus pro určení piezoelektrických koeficientů d_{33} a d_{31} a druhý pro určení koeficientu d_{15} pomocí metody laserové interferometrie.

9.1 Příprava vzorků na měření metodou laserové interferometrie

9.1.1 Vzorky pro určení piezoelektrických koeficientů d_{33} a d_{31}

Tvar daných vzorků (*obr. 9.1*) vyhovuje měření metodou laserové interferometrie, způsobu uchycení (viz. kap.: 8.2) a uzpůsobení elektrod pro vybudování příslušného kmitu popsaného piezoelektrickými koeficienty d_{33} a d_{31} (viz. kap.: 3.1).

Pro měření bylo nutno opatřit elektrody vzorků kontakty. Jako kontakty byly zvoleny měděné drátky s izolačním lakem na povrchu. Odizolované části kontaktů byly připevněny na elektrody vodivou pastou degussou. Druhý konec drátků sloužil pro přivedení napětí v teplotní komůrce kryostatu (*obr.:8.1*).

PZT keramika nemá reflexní povrch požadovaných vlastností, proto byl zajištěn odraz dopadající vlny pomocí zrcátka. Zrcátko o rozměrech 2 x 2mm bylo nalepeno na plochu vzorku dle měřeného piezoelektrického kmitu (viz. kap.: 3.1). Zrcátko bylo lepeno piceinem, který se rozpouští v xylenu.

Výrobce udává, že vzorek je polarizovaný, přesto byla provedena kontrola polarizace vzorků na d_{33} metru (viz. kap.: 4). Použitý d_{33} -metr byl kalibrován pro sílu $230 \cdot 10^{-3} \text{N}$. Měření bylo prováděno na rozsahu s chybou měření 2%.

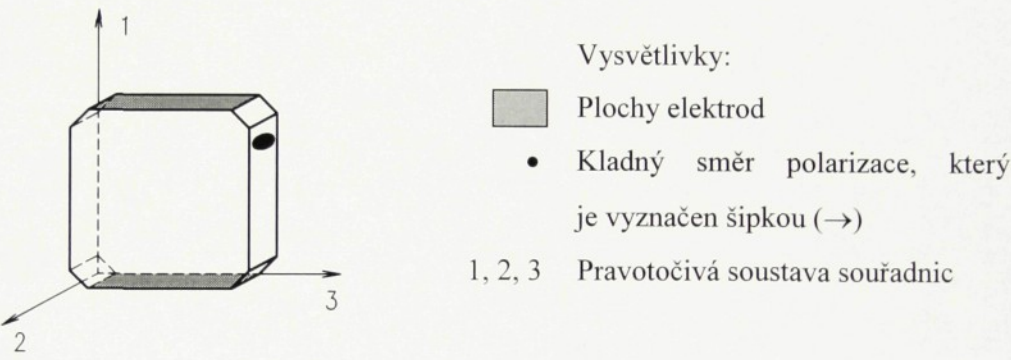
Tabulka 9.2.: Tabulka hodnot piezoelektrického koeficientu d_{33} měřeného pomocí d_{33} -metru pro vzorky tvaru kvádru (*obr. 9.1*).

Piezoelektrický koeficient	Typy PZT keramik dle složení			
	APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
$d_{33}[\text{pC/N}]$	255±5	488±10	577±12	211±5

9.1.2 Vzorky pro určení piezoelektrického koeficientu d_{15}

Umístění elektrod a tvar daných vzorků (*obr. 9.1*) neodpovídá navrhnutému způsobu určování koeficientu d_{15} laserovou interferometrií. Proto je nutná úprava vzorků.

Jako nejvhodnější tvar byl zvolen tvar se všemi zkosenými hranami ve směru tloušťky, jak je vidět na obrázku:



Obr.9.2.: Tvar upravených vzorků polarizované PZT keramiky pro určení piezoelektrického koeficientu d_{15} metodou laserové interferometrie.

Zkosená hrana při vybuzení kmitu v rovině (1,3) (viz. kap.: 3.1) kmitá kolmo ve směru kmitu vlivem symetričnosti vzorku. Vzniklá ploška slouží pro nalepení zrcátka pomocí piceinu (viz. kap.: 9.1.1).

Tvar vzorku (*obr. 9.2*) byl získán broušením příslušných hran. Brousilo se na otočném kotouči za použití vody a brusiva karbidu křemíku (SiC) o jemnosti 600.

U obroušeného vzorku byla provedena kontrola spontánní polarizace materiálu pomocí d_{33} -metru.

Tabulka 9.3: Tabulka hodnot piezoelektrického koeficientu d_{33} měřeného pomocí d_{33} -metru pro vzorky obroušeného tvaru s elektrodami ve směru 3.

Piezoelektrický koeficient	Typy PZT keramik dle složení			
	APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
$d_{33}[\text{pC/N}]$	314 ± 7	528 ± 11	669 ± 14	265 ± 6

K vybuzení požadovaného střižného kmitu popsaného koeficientem d_{15} na obroušeném piezoelektrickém vzorku dojde v případě, že je elektrické pole přiloženo ve směru 1 zvolené soustavy souřadnic (*obr. 9.2*). Bylo proto provedeno odstranění elektrod u obroušených vzorků ve směru 3 za pomoci koncentrované kyseliny dusičné. Následovalo opláchnutí vzorků v destilované vodě a očištění ultrazvukem.

Vzniklé zkosené plochy vzorků pro určení koeficientu d_{15} měly velikost:

- pro vzorky APC 840, APC 850 a APC 856 - 1x2mm.
- pro vzorek APC 880 - 2x2mm.

Nanesení elektrod ve směru 1 bylo provedeno pomocí vodivé degussy zároveň s přichycením kontaktních izolačních drátků (viz. kap.: 9.1.1).

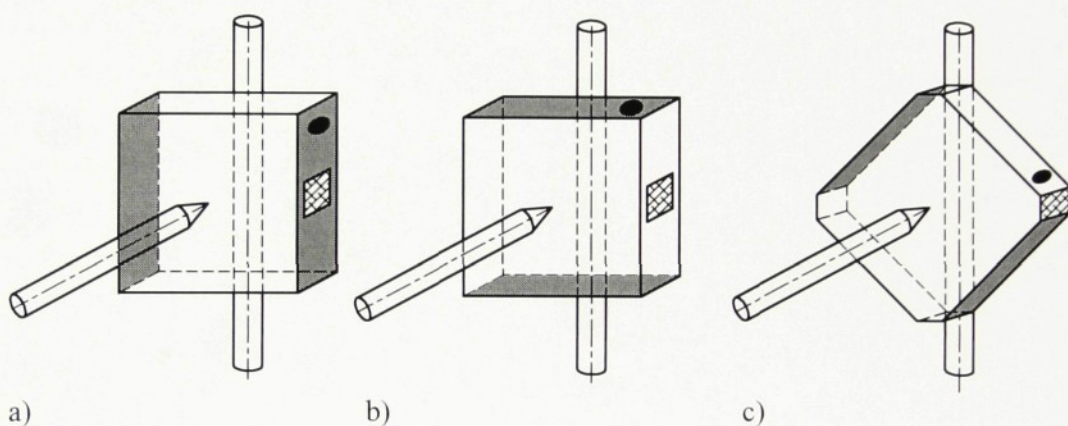
9.2 Kritéria pro měření piezoelektrických vzorků

Piezoelektrické vzorky polarizované PZT keramiky byly měřeny mimo oblast rezonance. V této oblasti se projevují pouze materiálové vlastnosti piezoelektrického rezonátoru, nikoli jeho tvar. Výhodou tohoto měření je, že kmity nejsou tak značné oproti kmitům v rezonanci (viz. kap.: 3), tudíž nedochází k tak výraznému povolování vzorku v mechanickém držáčku (viz. kap.: 8.2).

Při měření, nebo aplikacích piezoelektrických vzorků doporučuje výrobce pracovat s polarizovanými vzorky do teplot $\Theta_C[^\circ\text{C}]/2$ (*Tabulka 9.1*) a přivádět na vzorky elektrické pole do hodnoty $E_C/2$ (viz. kap.: 1.2).

9.3 Upnutí vzorků do držáčku interferometru

Vzorky jsou na základě rozměru držáčku upínány ve své tloušťce. Tento způsob uchycení zároveň využívá co největší kmitající část (aktivní délku (viz. kap.: 6.3)) piezoelektrického vzorku pro všechny možné typy kmitů u daného tvaru vzorků polarizované PZT keramiky.



Obr.9.3: Způsob uchycení vzorků v držáčku mikointerferometru pro určení piezoelektrických koeficientů a) d_{33} , b) d_{31} a c) d_{15}

Při měření koeficientu d_{31} se obě elektrody vzorku dotýkají vodivého válečku držáčku (viz. kap.: 8.2), který může zapříčinit jeho zkrat. Tato nevýhoda bylo řešena nalepením izolační pásky na vodivý váleček.

9.3.1 Způsob uchycení jednotlivých vzorků

Způsob uchycení vzorků APC 840 a APC 850 tvaru kvádru (*obr. 9.1*) do držáčku (viz. kap.: 9.3) pro určení koeficientů d_{31} a d_{33} :

- Hrot držáčku byl válcového tvaru s vrcholem zakončeným rádiusem.
- Vzorky byly uchycovány zhruba ve své polovině ve směru dopadajícího záření v mikointerferometru (*obr. 9.3*).

Způsob uchycení vzorků APC 856 a APC 880 tvaru kvádru (*obr. 9.1*) do držáčku (viz. kap.: 9.3) pro určení koeficientů d_{31} a d_{33} :

- Použitý hrot byl tvaru polokoule.
- Vzorky byly upínány tak, že jejich volná délka byla zhruba 3mm.

Způsob uchycení všech typů vzorků zkoseného tvaru (*obr. 9.2*) do držáčku (viz. kap.: 9.3) pro určení koeficientů d_{15} :

- Použitý hrot držáčku byl kuželového tvaru s ostrou špicí. Po prvním utažení se hrot deformoval (viz. kap.: 8.2). Vzniklá ploška dosedající na povrch vzorku měla průměr 1mm v průběhu všech měření.
- Vzorky byly upínány zhruba ve středu svých ploch (*obr. 9.3*).

10. Pracovní postup

1. Broušení vzorků pro určení koeficientu d_{15} metodou laserové interferometrie (viz. kap.: 9.1.2).
2. Měření potřebných rozměrů vzorků a koeficientu d_{33} pomocí d_{33} -metru (viz. kap.: 4).
3. Připevnění kontaktů a lepení zrcátek na vzorky (viz. kap.: 9.1.1, 9.1.2).
4. Zvolení vhodného držáčku pro určení všech piezoelektrických koeficientů (d_{31} , d_{33} a d_{15}) (viz. kap.: 8.2) a zároveň vhodného typu interferometru (viz. kap.: 7.2).
5. Uchycení vzorku do držáčku dle typu měřeného piezoelektrického koeficientu (obr. 9.3).
6. Sestavení mikrointerferometru a připojení přídatných zařízení (obr. 8.1, 8.2).
7. Přivedení napájecího napětí na piezoelektrický vzorek z digitálního generátoru (viz. kap.: 8.4) o síťové frekvenci a vhodně měřitelném napětí z důvodu ověření napětí na vzorku. Měření napětí se provádělo digitálním multimetrem typu M3900 série EC No. 99064491 od firmy FK technics.
8. Seřízení interferometru tak, aby byly na stínítku pozorovatelné soustředné interferenční kružnice (viz. kap.: 6.1).
9. Opětovná kontrola napájecího napětí na vzorku byla provedena přivedením signálu o amplitudě v rozmezí 5 - 10V a okem pozorovatelné frekvence (například 3Hz). Pokud bylo vše v pořádku, na stínítku byl okem pozorovatelný pulzující obrazec s frekvencí 3Hz.
10. Dostatečné utažení všech potřebných částí interferometru při zachování interferenčního obrazce nastaveného v bodě 8.
11. Aplikace teplotní komůrky na destičku s interferometrem (obr. 8.4).
12. Vytvoření vakua v prostoru teplotní komůrky pomocí turbomolekulární vývěvy (viz. kap.: 8.4). Pro měření teplotních závislostí se docilovalo v komůrce vakua o tlaku $(6 - 8) \cdot 10^{-3}$ Pa.
13. Nastavení vhodného zesílení fotodiody (na osciloskopu se zobrazila sinusovka) a offsetu na 0V.
14. Nastavení interferenčního obrazce na fotocitlivý povrch fotodiody pomocí zrcátka (obr. 8.1).

15. Metodika měření teplotních a přídavných závislostí pro všechny vzorky.

- a) Kalibrace interferometru (viz. kap.: 6.2), při nulovém budícím napětí piezoelektrického vzorku, změřením hodnot napětí $U_{\min}$ a $U_{\max}$ pomocí osciloskopu (viz. kap.: 8.4). Jednotlivá napětí byla nastavována fázovým modulátorem (viz. kap.: 8.1).
- b) Výpočet pracovního bodu interferometru (6.2).
- c) Nastavení pracovního bodu interferometru přivedením vhodného stejnosměrného napětí na fázový modulátor (viz. kap.: 8.1).
- d) Změření příslušné hodnoty napětí U_{out} pomocí přístroje Lock in (viz. kap.: 8.4), při amplitudě budícího napětí 5V a frekvenci 1kHz, při pokojové teplotě.
- e) Změření napěťové charakteristiky ($U_{\text{out}} = f(U_A)$) při pokojové teplotě vzorku a při konstantní frekvenci 1kHz.
- f) Změření frekvenční charakteristiky ($U_{\text{out}} = f(f)$) při pokojové teplotě vzorku a při konstantní amplitudě elektrického napětí U_A ($U_A = 5\text{V}$).
- g) Nastavení ovládání kryostatu pomocí počítače. Rychlost změny teploty byla volena 1K/min z důvodu přijatelné rychlosti změny teploty vzhledem k vzniklému pnutí materiálů jednotlivých elementů interferometru. Teplotní měření bylo zvoleno směrem z pokojové teploty do co nejnižších teplot a po ustálení opět z pokojové teploty do co nejvyšších možných teplot.
- h) Zapnutí kryostatu a spuštění chladicího média (vody) do obvodu pro chlazení kryostatu (viz. kap.: 8.4).
- i) Při docílení požadované teploty vypnutí kryostatu a provedení rychlého měření (viz. body: a), b), c) a d)), pro každou zvolenou teplotu.

16. Výpočet posunutí stěny vzorku d_0 (6.4).

17. Výpočet piezoelektrického koeficientu $d_{i\lambda}$ (6.6) definovaných pro konstantní entropii [18].

- Při pokojové teplotě (viz. bod: d))
- Pro napěťovou charakteristiku (viz. bod: e)) při pokojové teplotě ($d_{i\lambda} = f(U_A)$).
- Pro frekvenční charakteristiku (viz. bod: f)) při pokojové teplotě ($d_{i\lambda} = f(f)$).
- Pro teplotní závislost ($d_{i\lambda} = f(\Theta)$).

18. Zpracování naměřených a vypočtených výsledků do tabulek (Příloha č.1-11).

Vytvoření grafů napěťové ($d_{i\lambda} = f(U_A)$) a frekvenční charakteristiky ($d_{i\lambda} = f(f)$), pro vybrané vzorky.

19. Vytvoření grafů teplotních závislostí všech piezoelektrických koeficientů pro dané typy vzorků polarizované PZT keramiky (Příloha č.12-15).

20. Zhodnocení výsledků.

11. Stanovení chyb

Chyba měřicí metody laserové interferometrie

Určení piezoelektrických koeficientů metodou laserové interferometrie je nepřímou měřicí metodou [19]. Relativní chyba měřicí metody je dána chybou měření napětí $U_{\max}$, $U_{\min}$ a U_{out} . Chyby těchto hodnot ($\vartheta(U_{\max})$, $\vartheta(U_{\min})$, $\vartheta(U_{\text{out}})$) byly stanoveny na 3%, tudíž výsledná relativní chyba vyšla 5%.

Výpočet chyby měřicí metody je zároveň chybou určení posunutí d_0 ($\vartheta(d_0)$) (6.4).

Chyba určení aktivní délky

Pro měření teplotních závislostí musel být vzorek dostatečně upevněn, aby nedošlo vlivem kmitů vzorku a kmitů kryostatu k jeho povolení. Již mírné povolení vyvolalo pootočení vzorku v držáčku, a tím byla způsobena změna, až případná ztráta interferenčního obrazce. Ovšem vlivem utažení vzorku docházelo k deformaci hrotu držáčku vyrobeného z umělé hmoty (viz. kap.: 8.2).

Deformovaný hrot měl dosedací plochu na stěnu piezoelektrického vzorku o průměru až 1mm. Tudíž bylo nesnadné přesně určit aktivní délku vzorku (*obr.8.3*), která se lišila ze strany válečku a ze strany hrotu držáčku. Chyba určení aktivní délky x ($\vartheta(x)$) byla stanovena na 0,5mm čili 10%.

Chyba výpočtu piezoelektrických koeficientů d_{iy} metodou laserové interferometrie

Chybu výpočtu piezoelektrických koeficientů d_{iy} (6.6) nejvíce ovlivnila chyba $\vartheta(x)$ a $\vartheta(d_0)$. Výsledná chyba $\vartheta(d_{iy})$ vyšla 12%.

Chyba určení piezoelektrických koeficientů d_{15}

Chyba určení piezoelektrického koeficientu d_{15} je dána chybou výpočtu koeficientu d_{15} a chybou tvaru vzorku (*obr. 9.2*). Vztah pro výpočet piezoelektrických koeficientů (6.6) je totiž odvozen za předpokladu, že vzorek je tvaru kváдру, u kterého je docíleno homogenního budícího napětí na jeho elektrodách.

Dále byly tyto vzorky broušeny (viz. kap.: 9.1.2), a tím mohlo dojít k depolarizaci vzorku (viz. kap.: 2.2).

Chyba uchycení vzorků

Vlivem mechanického napětí působícího na stěny piezoelektrického vzorku (obr. 9.3) může dojít k částečnému zatlumení měřeného kmitu, nebo vyvolání nežádoucího přímého piezoelektrického jevu (viz. kap.: 1.1). Navíc vodivý váleček držáčku odvádí povrchový náboj na stěnách vzorku a tak může též docházet k zeslabení amplitudy měřeného kmitu.

Dále se u tohoto držáčku při měření teplotních charakteristik může projevit teplotní roztažnost držáčku.

Chyba lepeného zrcátka na povrch měřeného vzorku

Na měřeném povrchu vzorku, pro metodu laserovou interferometrii, musí být nalepeno zrcátko (viz. kap.: 9.1.1). Vlivem lepení zrcátka není měřený povrch vzorku zcela volný (obr. 9.3) a může zde dojít k zatlumení kmitu. Navíc se při měření v širokém teplotním rozsahu může projevit i teplotní nestabilita použitého lepicího tmelu a jeho elasticita.

12. Výsledky měření

12.1 Naměřené výsledky

Bylo provedeno určení všech tří piezoelektrických koeficientů (viz. kap.: 10 bod 17)) (d_{31} , d_{33} , d_{15}) pro dané typy vzorků polarizované PZT keramiky (APC 840, APC 850, APC 856, APC 880) při pokojové teplotě metodou laserové interferometrie.

Byly změřeny koeficienty d_{33} pomocí d33-metru pro všechny typy vzorků při pokojové teplotě.

Tabulka 12.1.: Tabulka hodnot piezoelektrických koeficientů typů polarizované PZT keramiky určená při pokojové teplotě

- Hodnoty dané výrobcem (firmou APC) (Tabulka 9.1)
- Hodnoty vypočtené na základě interferometrických měření (měřeno při $f=1\text{kHz}$ a $U_A=5\text{V}$) (Příloha č.1, 5, 9)
- Hodnoty naměřené d33-metrem (Tabulka 9.2)

	Typy PZT keramik dle složení			
Piezoelektrické koeficienty	APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
d_{33} [pC/N] udávané výrobcem	290	400	620	215
d_{33} [pC/N] určené interferometricky	284	258	673	269
d_{33} [pC/N] měřené d33-metrem	255	488	577	211
$-d_{31}$ [pC/N] udávané výrobcem	125	175	260	95
$-d_{31}$ [pC/N] určené interferometricky	83	195	294	100
d_{15} [pC/N] udávané výrobcem	480	590	710	330
d_{15} [pC/N] určené interferometricky	284	367	294	236

Z tabulky je patrné, že hodnoty piezoelektrického koeficientu d_{33} měřené pomocí d33-metru jsou převážně nižší (maximálně o 22%) než hodnoty z katalogu (Tabulka 9.1) a hodnoty určené interferometricky.

Hodnoty získané interferometricky pro koeficienty d_{33} a d_{31} se liší vůči hodnotám udávaným výrobcem zhruba v rozmezí 2-32%. Na základě tohoto srovnání ovšem nelze učinit závěr o přesnosti výsledků získaných metodou laserové interferometrie, jelikož nebyla známa měřicí metoda piezoelektrických koeficientů a zároveň chyba stanovení výsledků udávaných v katalogu výrobce [17].

Hodnoty interferometricky stanovených koeficientů d_{15} se již výrazně liší od hodnot udávaných výrobcem. Rozdíly činí odchylku okolo 40%, což je převážně způsobeno chybou tvaru vzorku (viz. kap.: 11).

Tabulka 12.2.: Tabulka naměřených hodnot piezoelektrických koeficientů pomocí d33-metru pro dané typy polarizované PZT keramiky obroušeného tvaru (obr. 9.2), kde elektrody byly ve směru $\mathcal{J}$. Uvedené hodnoty jsou pro pokojovou teplotu.

- Hodnoty dané výrobcem (firmou APC) (Tabulka 9.1)
- Hodnoty naměřené d33-metrem (Tabulka 9.2, 9.3)

	Typy PZT keramik dle složení			
Piezoelektrické koeficienty	APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
d_{33} [pC/N] udávané výrobcem	290	400	620	215
d_{33} [pC/N] měřené d33-metrem pro zbroušené vzorky	314	528	669	265
d_{33} [pC/N] měřené d33-metrem pro vzorky tvaru kvádrů	255	488	577	211

Z tabulky hodnot je patrné, že obroušení hran vzorků způsobilo vzrůst koeficientu d_{33} v průměru o 20% hodnoty piezoelektrického koeficientu vzorku tvaru kvádrů.

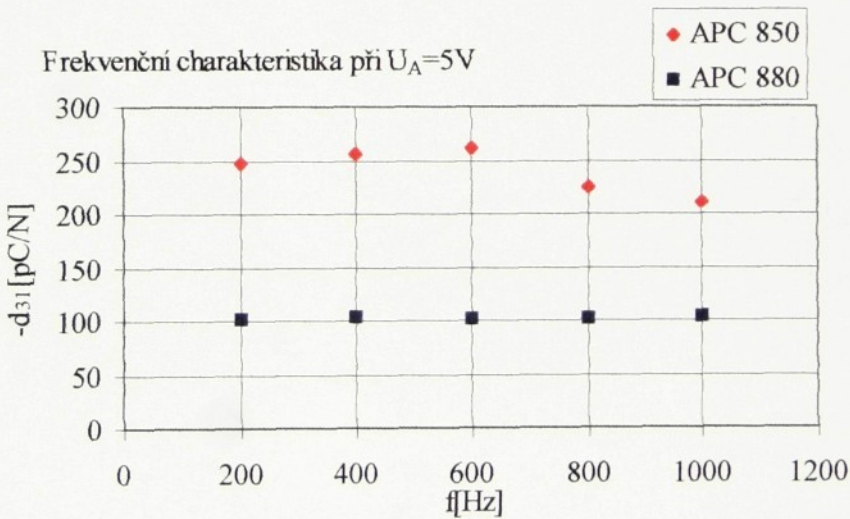
12.2 Charakteristiky

Určení frekvenční a napěťové charakteristiky piezoelektrických koeficientů metodou laserové interferometrie

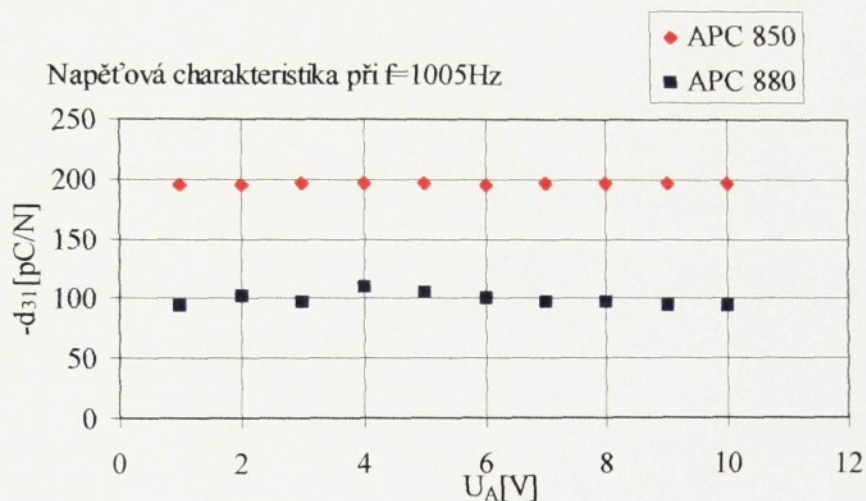
Bylo provedeno určení frekvenční závislosti piezoelektrických koeficientů v rozsahu (200-1000)Hz pro konstantní amplitudu budícího napětí. Dále byly vypočteny hodnoty piezoelektrických koeficientů z naměřených hodnot v rozsahu budícího napětí (1-10)V pro napěťovou charakteristiku (viz. kap.: 10 bod 17).

Tabulky hodnot všech tří koeficientů pro všechny vzorky jsou uvedeny v přílohách č.1, 5 a 9.

Graf 12.1: Frekvenční charakteristika piezoelektrického koeficientu d_{31} vybraných typů vzorků polarizované PZT keramiky, určená interferometricky.



Graf 12.2: Napěťová charakteristika piezoelektrického koeficientu d_{31} vybraných typů vzorků polarizované PZT keramiky, určená interferometricky.

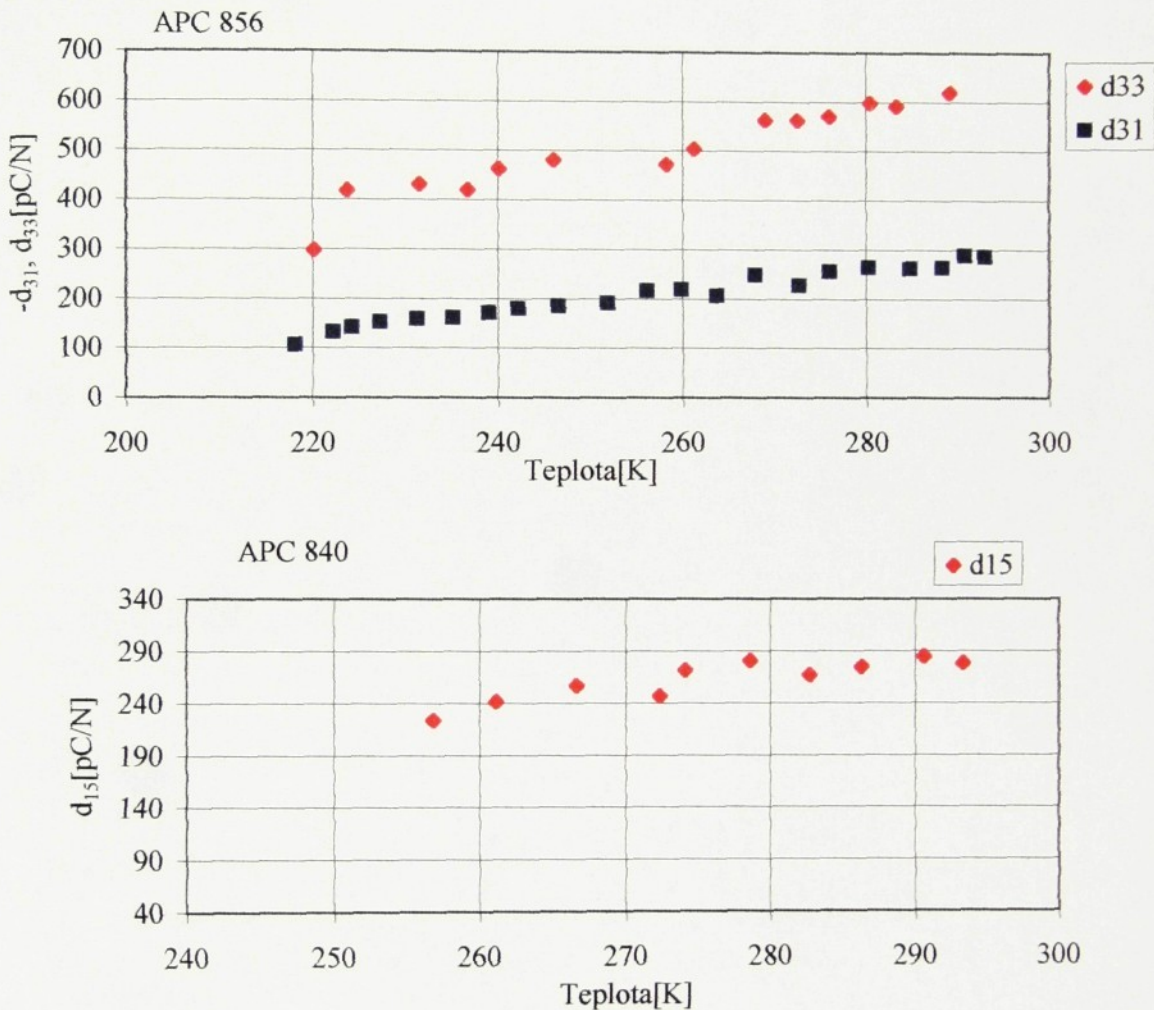


Frekvenční charakteristika (Graf 12.1) popisuje nezávislost piezoelektrických koeficientů v rozmezí frekvencí (200-1000)Hz. Z amplitudové charakteristiky (Graf 12.2) je patrné, že příspěvek elektrostriční deformace (viz. kap.: 1.4) je v měřené oblasti budícího napětí (1-10)V zanedbatelný, jelikož hodnoty piezoelektrických koeficientů jsou zde konstantní.

Určení teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů metodou laserové interferometrie

Bylo provedeno určení teplotních závislostí všech piezoelektrických koeficientů pro všechny typy polarizované PZT keramiky v co nejširším možném teplotním rozsahu (viz. kap.: 10. bod 17). Výsledky piezoelektrických koeficientů byly stanoveny na základě naměřených hodnot metodou laserové interferometrie (Příloha č. 2-4, 6-8, 10, 11). Při měření byly vzorky napájeny harmonickým napětím o amplitudě 5V a frekvenci 1kHz.

Graf 12.3: Teplotní závislosti piezoelektrických koeficientů d_{31} , d_{33} a d_{15} vybraných typů vzorků polarizované PZT keramiky, určené interferometricky.



Grafy určených teplotních závislostí znázorňují klesající hodnotu piezoelektrického koeficientu se snižující se teplotou. Klesající charakter průběhu je dán snižující se pohyblivostí doménových stěn (viz. kap.: 1.1.3) PZT keramiky s klesající teplotou. Zhruba dvojnásobný pokles byl zaznamenán pro vzorky APC 850 a APC 856, tedy pro měkké piezoelektrické PZT keramiky, ve srovnání se vzorky APC 840 a APC 880, které patří do třídy tvrdých keramik (viz. kyp.: 2.6).

13. Návrhy na možné zpřesnění výsledků

Při měření a zpracování výsledků diplomové práce se ukázalo, že by bylo vhodné změřit teplotní závislosti indexu lomu komponent mikointerferometru (*obr. 8.2*), konkrétně polarizačního hranolu a $\lambda/4$ destiček. Zjistilo by se tak, zda teplotní závislosti piezoelektrických koeficientů (*Graf 12.3*) nejsou ovlivněny teplotními závislostmi indexu lomu daných částí mikointerferometru.

Jelikož při výpočtu piezoelektrických koeficientů byl problém s určením aktivní délky (viz. kap.: 11) vzorku v držáčku mikointerferometru (*obr.8.3*), bylo by proto vhodné navrhnout nové uchycení vzorku, které by tuto nevýhodu co nejvíce potlačilo.

Také bych navrhovala porovnat vliv různého uchycení vzorků v mikointerferometru (lepené vzorky a uchycené v mechanických držáčkách (*obr. 8.3*) různě velkou mechanickou silou) na velikost měřeného piezoelektrického koeficientu.

Dále by dle mého názoru bylo dobré pomocí matematického modelování stanovit kmity piezoelektrických vzorků, abychom co nejlépe mohli vzorek upnout do držáčku (*obr. 8.3*). Na základě matematického modelování by bylo vhodné simulací určit i lepší tvar vzorku pro určení koeficientu d_{15} metodou laserové interferometrie (viz. kap.: 11).

ZÁVĚR

Pomocí mikointerferometru (viz. kap.: 8) byly určeny všechny piezoelektrické koeficienty (d_{31} , d_{33} a d_{15}) při pokojové teplotě a jejich teplotní závislosti pro dané vzorky polarizované PZT keramiky typového označení APC 840, APC 850, APC 856 a APC 880.

Z tabulky hodnot piezoelektrických koeficientů při pokojové teplotě (*Tabulka 12.1*) je patrné, že koeficienty d_{31} a d_{33} určené metodou laserové interferometrie jsou blízké hodnotám uváděným výrobcem firmou Piezokeramika s.r.o. Libřice, kdežto koeficienty d_{15} jsou vůči nim nižší (viz. kap.: 12.1). Nízké hodnoty těchto koeficientů jsou převážně dány úpravou původního tvaru vzorků (*Tabulka 12.2*).

Výsledky piezoelektrických koeficientů d_{31} a d_{33} určených metodou laserové interferometrie pro daný typ držáčku byly stanoveny s chybou 12%. Chyba určení koeficientu d_{15} byla navíc ovlivněna tvarem vzorku (viz. kap.: 11).

Grafy určených teplotních závislostí (Příloha č.12-15) znázorňují klesající hodnotu piezoelektrického koeficientu se snižující se teplotou. Klesající charakter průběhu je dán snižující se pohyblivostí doménových stěn (viz. kap.: 1.1.3) PZT keramiky s klesající teplotou. Zhruba dvojnásobný pokles byl zaznamenán pro vzorky APC 850 a APC 856, tedy pro měkké piezoelektrické PZT keramiky, ve srovnání se vzorky APC 840 a APC 880, které patří do třídy tvrdých keramik.

Měření piezoelektrických vzorků bylo převážně prováděno z pokojové teploty do nízkých teplot. Nejnižší dosažená teplota byla 210K (Příloha č.4). Dolní hranice teplot pro vzorky tvaru kvádru (viz. kap.: 9.1.1) byla limitována ztrátou interferenčního obrazce způsobenou povolením vzorku v držáčku mikointerferometru (viz. kap.: 8.2). U měření vzorků k určení koeficientů d_{15} byla dolní hranice (zhruba 270K) dána pravděpodobně výraznou teplotní závislostí pokaženého, rozlepeného optického polarizačního hranolu (viz. kap.: 8.1). Nad pokojovou teplotu nebylo měření provedeno z časových důvodů.

Frekvenční charakteristika (*Graf 12.1*) popisuje nezávislost piezoelektrických koeficientů v rozmezí frekvencí (200-1000)Hz. Z amplitudové charakteristiky (*Graf 12.2*) je patrné, že příspěvek elektrostrikční deformace je v měřené oblasti budícího napětí (1-10)V zanedbatelný, jelikož hodnoty piezoelektrických koeficientů jsou zde konstantní.

Použitá literatura

- [1] Šulc M., Burianová L.: Studium piezoelektrických dějů pomocí laserové interferometrie, *Jemná mechanika a optika*, (10) (2001), 338-343
- [2] Zelenka J.: Sto let od objevení piezoelektriny, *Slaboproudý obzor*, **41** (5) (1980), 237-243
- [3] Kraus I.: *Struktura a vlastnosti krystalů*, Academia, Praha 1963
- [4] Petržílka V., Slavík J. B., Šolc J., Taraba O., Tichý J., Zelenka J.: *Piezoelektrina a její technické použití*, ČSAV, Praha 1960
- [5] Q. M. Zhang, H. Wang, N. Kim, L. E. Cross: Direct evaluation of domain-wall and intrinsic contributions to the dielectric and piezoelectric response and their temperature dependence on lead zirconate-titanate ceramics, *J. Appl. Phys.*, **75** (1) (1994), 454-459
- [6] Paik D. S. et. al.: Dielectric and piezoelectric properties of perovskite materials at cryogenic temperatures, *J. Mat. Sciencies*, **34** (1999), 469-473
- [7] Přednášky Doc. J. Erharta: *Piezoelektrické materiály*
- [8] Jaffe B., Cook W. R., Jaffe H.: *Piezoelectric ceramics*, Academic Press, London 1971
- [9] Waanders J.W.: *Piezoelectric Ceramics*, Philips Components, Eindhoven 1991
- [10] Zelenka J.: *Piezoelektrické rezonátory a jejich použití*, Academia, Praha 1983
- [11] Přednášky RNDr. M. Šulce: *Vybrané kapitoly z optiky*
- [12] Saleh B. E. A., Teich M. C.: *Základy fotoniky*, Matfyzpress, Praha 1994
- [13] Fujii S., Kanno I., Kamada T., Takayama R.: Preparation of c-Axis Oriented Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films by RF-Magnetron Sputtering and their Dielectric and Piezoelectric Properties, *J. Appl. Phys.*, **36** (9B) (1997), 6065-6068
- [14] Barad Y., Yu Lu, Cheng Z.-Y, Park S.-E., Zhang Q. M.: Composition, temperature, and crystal orientation dependence of the linear electro-optic properties of Pb(Zn_{1/3},Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ single crystals, *Appl. Phys. Lett.*, **77** (9) (2000), 1247-1249
- [15] Privátní informace RNDr. M. Šulce

- [16] Šulc M., Burianová L., Nosek J.: On the precision of the new laser interferometr in a wide temperature range, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 26 (2001), 43-48
- [17] Katalog firmy APC International Ltd., Piezo ceramics, Piezoelectric ceramics and devices in various shapes and sizes consisting of soft and hard body lead-zircone-titanate
- [18] Privátní informace Prof. V. Janovce
- [19] Brož J. & kol.: *Základy fyzikálních měření I*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1967

PŘÍLOHY

Příloha č.1	Tabulka hodnot pro měření d_{31} při pokojové teplotě
Příloha č.2	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{31} vzorku APC 840 Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{31} vzorku APC 850
Příloha č.3	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{31} vzorku APC 856
Příloha č.4	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{31} vzorku APC 880
Příloha č.5	Tabulka hodnot pro měření d_{33} při pokojové teplotě
Příloha č.6	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{33} vzorku APC 840 Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{33} vzorku APC 850
Příloha č.7	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{33} vzorku APC 856
Příloha č.8	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{33} vzorku APC 880
Příloha č.9	Tabulka hodnot pro měření d_{15} při pokojové teplotě
Příloha č.10	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{15} vzorku APC 840 Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{15} vzorku APC 850
Příloha č.11	Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{15} vzorku APC 856 Tabulka hodnot pro měření teplotní závislosti d_{15} vzorku APC 880
Příloha č.12	Grafy teplotních závislostí d_{31} a d_{33} vzorků APC 840 a APC 850
Příloha č.13	Grafy teplotních závislostí d_{31} a d_{33} vzorků APC 856 a APC 880
Příloha č.14	Grafy teplotních závislostí d_{15} vzorků APC 840 a APC 850
Příloha č.15	Grafy teplotních závislostí d_{15} vzorků APC 856 a APC 880

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření piezoelektrického koeficientu d_{31} při pokojové teplotě

$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $x=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pro APC 840 a APC 850

$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $x=3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pro APC 856 a APC 880

Konstanty		d_{31}			
		APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
$f = 1 \text{ kHz}$	$U_{\max} [\text{V}]$	2,688	0,529	2,606	2,158
$U_A = 5 \text{ V}$	$U_{\min} [\text{V}]$	0,130	-0,122	0,429	0,129
	$U_p [\text{V}]$	1,409	0,204	1,518	1,144
	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	3,758	2,190	13,456	4,382
	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	209	479	880	308
	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$	83	195	294	100
Tabulka pro frekvenční charakteristiku					
	$f [\text{Hz}]$	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$			
$U_A = 5 \text{ V}$	200	78	247	293	102
	400	78	257	291	103
	600	79	262	292	102
	800	79	225	290	102
	1000	80	210	291	103
Tabulka pro napěťovou charakteristiku					
	$U_A [\text{V}]$	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$			
$f = 1 \text{ kHz}$	1	85	195	300	94
	2	87	195	264	102
	3	65	196	274	97
	4	65	197	291	110
	5	81	197	293	105
	6	82	195	290	100
	7	78	196	291	98
	8	75	197	276	97
	9	88	197	284	95
	10	101	196	275	94

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{31} vzorku APC 840

$$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$-d_{31} \cdot [10^{-12} \text{ C/N}]$
236,4	1,178	0,665	0,922	0,624	173	69
242	1,375	0,314	0,845	1,342	180	71
251,1	1,691	0,380	1,036	1,780	193	77
254,4	2,156	0,283	1,220	2,506	191	76
257	2,130	0,270	1,200	2,532	194	77
262,2	2,130	0,268	1,199	2,400	184	73
263	2,042	0,282	1,162	2,789	226	89
266,6	2,018	0,260	1,139	2,770	224	89
269	1,996	0,294	1,145	2,522	211	84
278,8	1,151	0,302	0,727	1,406	236	94
290,7	1,676	0,522	1,099	1,599	197	78
292,9	2,425	0,255	1,340	3,196	210	83

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{31} vzorku APC 850

$$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$
220,6	0,077	-0,079	-0,001	0,393	359	146
230,5	0,169	-0,126	0,022	0,788	380	154
240,1	0,246	-0,110	0,068	1,026	410	167
250,1	0,371	-0,126	0,123	1,609	461	187
259,4	0,429	-0,122	0,154	2,058	532	216
269,8	0,315	-0,120	0,098	2,031	665	270
279,6	0,205	-0,113	0,046	1,198	537	218
290	0,015	-0,125	-0,055	0,522	531	216

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{31} vzorku APC 856

$$t=5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x=3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\text{max}}[\text{V}]$	$U_{\text{min}}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$
218,1	0,456	0,168	0,312	0,642	318	106
222,2	0,506	0,168	0,337	0,942	397	133
224,2	1,059	0,264	0,662	2,361	423	142
227,2	1,540	0,315	0,928	3,919	456	152
231,2	1,580	0,421	1,001	3,870	476	159
235,1	1,465	0,277	0,871	4,026	483	162
239	1,115	0,236	0,676	3,150	510	171
242,2	1,050	0,260	0,655	2,990	539	180
246,5	1,215	0,222	0,719	3,855	553	185
251,8	1,094	0,254	0,674	3,381	573	192
256,1	1,055	0,281	0,668	3,517	647	217
259,8	1,172	0,342	0,757	3,802	652	218
263,7	0,925	0,197	0,561	3,160	618	207
267,9	1,218	0,188	0,703	5,374	743	249
272,7	1,759	0,221	0,990	7,361	682	228
276	1,723	0,223	0,973	8,067	766	256
280,2	1,692	0,252	0,972	7,997	791	265
284,7	1,880	0,270	1,075	8,862	784	262
288,2	1,580	0,272	0,926	7,247	789	264
290,7	2,148	0,256	1,202	11,461	863	289
292,9	2,153	0,257	1,205	11,412	857	287

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{31} vzorku APC 880

$$t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\text{max}}[\text{V}]$	$U_{\text{min}}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$
210,1	1,254	0,555	0,905	0,692	141	47
213,6	1,509	0,660	1,085	0,856	144	48
217,6	1,954	0,614	1,284	1,497	159	53
225,1	2,280	0,640	1,460	1,854	161	54
230,4	2,505	0,760	1,633	2,362	193	65
236,2	2,860	1,040	1,950	2,560	200	67
240,3	2,072	0,450	1,261	2,772	243	81
249,6	1,585	0,800	1,193	1,600	290	97
271,1	1,320	0,460	0,890	1,713	284	95
295,6	2,158	0,129	1,144	4,382	308	103
300,3	2,290	0,148	1,219	4,533	301	101
304,8	2,408	0,197	1,303	4,832	311	104

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření piezoelektrického koeficientu d_{33} při pokojové teplotě

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$, $x=2,5\cdot10^{-3}\text{m}$ pro APC 840 a APC 850

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$, $x=3\cdot10^{-3}\text{m}$ pro APC 856 a APC 880

Konstanty		d_{33}			
		APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
$f = 1\text{kHz}$ $U_A=5\text{V}$	$U_{\text{max}}[\text{V}]$	5,149	0,656	3,419	2,440
	$U_{\text{min}}[\text{V}]$	1,580	-0,105	0,185	0,586
	$U_p[\text{V}]$	3,365	0,276	1,802	1,513
	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	17,762	3,446	45,410	10,426
	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	709	645	2000	801
	$d_{33} [10^{-12}\text{C/N}]$	284	258	673	269
Tabulka pro frekvenční charakteristiku					
	$f[\text{Hz}]$	$d_{33} [10^{-12}\text{C/N}]$			
$U_A=5\text{V}$	200	280	276	679	266
	400	285	273	681	263
	600	278	272	675	263
	800	285	270	680	265
	1000	277	270	671	267
Tabulka pro napěťovou charakteristiku					
	$U_A[\text{V}]$	$d_{33} [10^{-12}\text{C/N}]$			
$f = 1\text{kHz}$	1	381	260	807	269
	2	231	261	581	239
	3	180	260	636	247
	4	183	260	660	244
	5	220	259	671	259
	6	239	260	686	259
	7	229	258	696	250
	8	266	258	702	255
	9	263	257	705	255
	10	266	256	705	255

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{33} vzorku APC 840

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$ $U_A = 5\text{V}$

$x=2,5\cdot10^{-3}\text{m}$ $f = 1\text{kHz}$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\text{max}}[\text{V}]$	$U_{\text{min}}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{33} [10^{-12}\text{C/N}]$
232,6	2,039	0,496	1,268	6,475	598	239
243	3,557	0,738	2,148	11,857	599	240
247,2	3,565	0,785	2,175	12,340	632	253
257,8	4,681	0,926	2,804	17,333	657	263
263,3	1,645	0,208	0,927	6,803	674	270
273,4	2,339	0,350	1,345	8,860	634	254
282,6	2,460	0,505	1,483	9,648	703	281
289,9	2,486	0,491	1,489	9,986	713	285
292,3	2,740	0,338	1,539	12,627	749	299

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{33} vzorku APC 850

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$ $U_A = 5\text{V}$

$x=2,5\cdot10^{-3}\text{m}$ $f = 1\text{kHz}$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\text{max}}[\text{V}]$	$U_{\text{min}}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{33} [10^{-12}\text{C/N}]$
230	-0,091	-0,125	-0,108	0,130	545	218
239,4	0,105	-0,089	0,008	0,735	540	216
271,3	0,616	0,049	0,333	2,426	609	244
283,1	1,670	0,280	0,975	7,240	742	297
290,2	1,060	-0,009	0,526	5,200	693	277
295	0,008	-0,110	-0,051	0,587	709	283
298	0,186	-0,062	0,062	1,276	733	293
306,7	0,239	-0,075	0,082	1,830	830	332
314,6	0,425	-0,114	0,156	2,650	700	280
318,9	0,301	-0,131	0,085	2,268	748	299

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{33} vzorku APC 856

$$t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta [\text{K}]$	$U_{\max} [\text{V}]$	$U_{\min} [\text{V}]$	$U_p [\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$d_{33} [10^{-12} \text{ C/N}]$
220,1	0,117	0,108	0,113	0,056	886	298
223,7	0,410	0,220	0,315	1,658	1243	418
231,5	1,256	0,162	0,709	9,864	1284	432
236,7	1,641	0,151	0,896	13,091	1251	421
240,1	1,707	0,212	0,960	14,460	1378	463
246	1,780	0,267	1,024	15,187	1430	481
258,2	1,234	0,695	0,965	5,320	1406	473
261,2	1,446	0,512	0,979	9,846	1501	505
269	1,328	0,354	0,841	11,450	1674	563
272,5	1,759	0,219	0,989	18,120	1676	564
276	1,846	0,222	1,034	19,360	1698	571
280,4	2,207	0,171	1,189	25,450	1780	599
283,3	2,940	0,205	1,573	33,820	1761	592
289,1	3,408	0,189	1,799	41,690	1845	620
290,5	3,680	0,276	1,978	45,500	1904	640

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{33} vzorku APC 880

$$t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$U_A = 5 \text{ V}$$

$$x = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3} \text{ V}]$	$d_0 [10^{-12} \text{ m}]$	$d_{33} [10^{-12} \text{ C/N}]$
245,6	0,438	0,163	0,301	1,189	616	206
251,1	0,759	0,252	0,506	2,239	629	211
265,4	0,987	0,290	0,639	3,131	640	214
272,8	1,646	0,477	1,062	5,784	705	236
277,9	1,679	0,592	1,136	5,923	776	260
281,6	2,613	0,439	1,526	11,544	756	253
285,2	1,109	0,381	0,745	3,772	738	247
293,8	0,586	2,440	1,513	10,426	801	268
295,5	1,025	0,165	0,595	5,858	970	325
298	0,891	0,209	0,550	4,887	1021	342

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření piezoelektrického koeficientu d_{15} při pokojové teplotě

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$, $x=3\cdot10^{-3}\text{m}$ pro APC 840, APC 850, APC 856

$t=5\cdot10^{-3}\text{m}$, $x=2,5\cdot10^{-3}\text{m}$ pro APC 880

Konstanty		d_{15}			
		APC 840	APC 850	APC 856	APC 880
$f = 1\text{kHz}$	$U_{\max}[\text{V}]$	2,104	2,105	4,320	2,542
$U_A=5\text{V}$	$U_{\min}[\text{V}]$	0,215	0,223	0,366	0,514
	$U_p[\text{V}]$	1,160	1,164	2,343	1,528
	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	11,259	14,492	24,36	8,491
	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	849	1097	877	596
	$d_{15} [10^{-12}\text{C/A}]$	284	367	294	236
	Tabulka pro frekvenční charakteristiku				
	$f[\text{Hz}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$			
$U_A=5\text{V}$	200	284	379	273	234
	400	280	371	268	231
	600	283	371	264	231
	800	280	367	259	229
	1000	278	369	255	228
	Tabulka pro napěťovou charakteristiku				
	$U_A[\text{V}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$			
$f = 1\text{kHz}$	1	360	385	293	192
	2	256	368	288	200
	3	251	375	272	174
	4	265	375	279	192
	5	269	369	282	193
	6	264	371	281	181
	7	267	370	280	184
	8	263	371	269	176
	9	265	378	267	167
	10	262	373	275	181

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorku APC 840

$$t=5\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$U_A = 5\text{V}$$

$$x=3\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$f = 1\text{kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$
256,8	1,606	0,296	0,951	6,150	669	224
261,1	1,817	0,212	1,015	8,140	722	242
266,6	2,365	0,140	1,253	12,012	769	257
272,3	2,250	0,165	1,208	10,814	739	247
274,1	2,118	0,174	1,146	11,078	812	272
278,6	2,239	0,197	1,218	12,030	839	281
282,7	2,494	0,196	1,345	12,876	798	267
286,3	2,339	0,205	1,272	12,314	822	275
290,6	2,304	0,181	1,243	12,676	850	285

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorku APC 850

$$t=5\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$U_A = 5\text{V}$$

$$x=3\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$f = 1\text{kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$
274,2	2,213	0,502	1,357	9,441	786	263
277,6	3,142	0,520	1,831	15,108	821	275
281,2	2,450	0,406	1,428	13,941	971	325
285,9	2,916	0,266	1,591	19,579	1052	352
290,2	2,597	0,152	1,375	20,410	1189	398
291,6	2,418	0,135	1,277	18,536	1156	387

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorku APC 856

$$t=5\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$U_A = 5\text{V}$$

$$x=3\cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$f = 1\text{kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$
267	2,132	0,602	1,367	7,868	732	245
271,7	2,621	0,842	1,732	9,208	737	247
276,1	2,271	0,593	1,432	9,638	818	274
281,3	4,661	0,465	2,563	24,530	833	279
286	3,950	0,599	2,275	24,730	1051	352
289,5	5,100	0,404	2,752	23,830	723	242
291,4	4,254	0,455	2,355	21,960	823	276

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro měření teplotní závislosti
piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorku APC 880

$$t=5\cdot 10^{-3}\text{m}$$

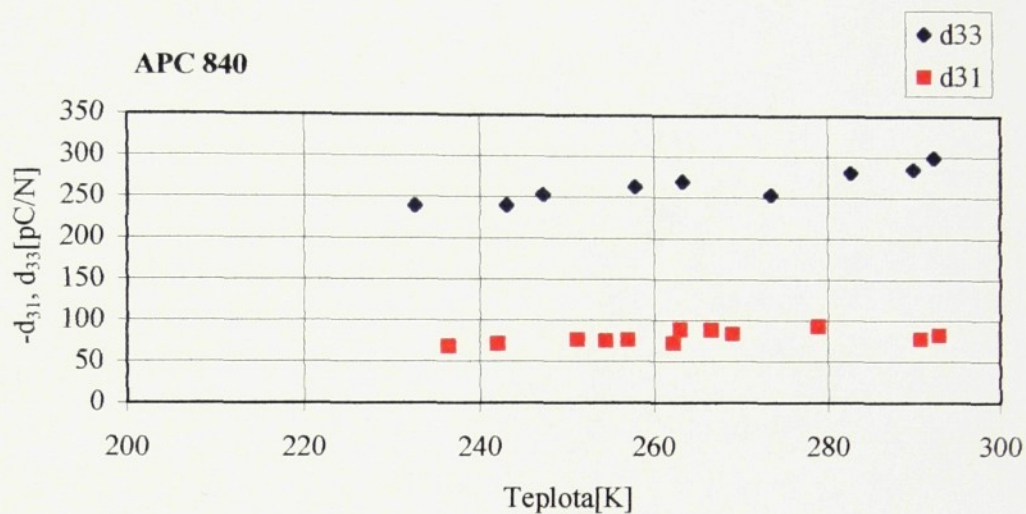
$$U_A = 5\text{V}$$

$$x=2,5\cdot 10^{-3}\text{m}$$

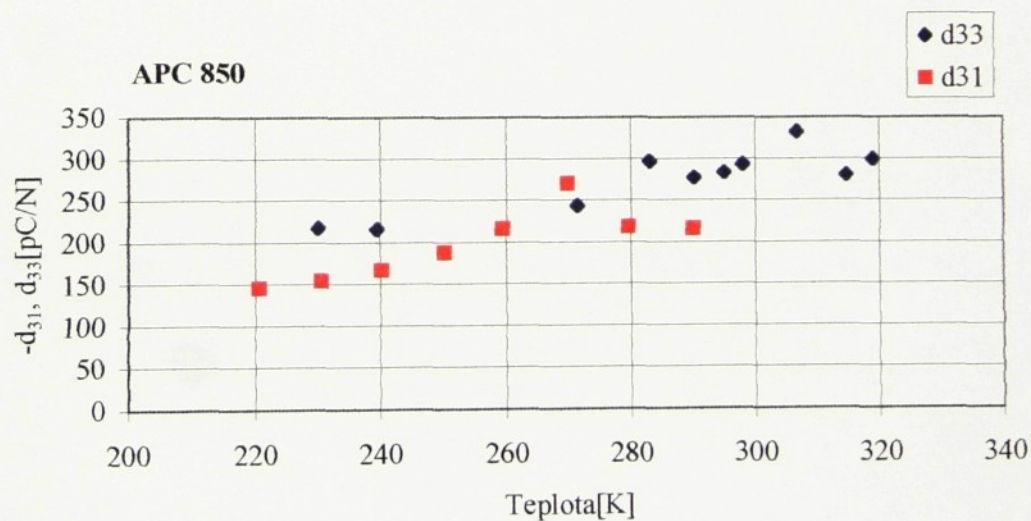
$$f = 1\text{kHz}$$

$\Theta[\text{K}]$	$U_{\max}[\text{V}]$	$U_{\min}[\text{V}]$	$U_p[\text{V}]$	$U_{\text{out}} [10^{-3}\text{V}]$	$d_0 [10^{-12}\text{m}]$	$d_{15} [10^{-12}\text{C/N}]$
273,2	4,500	0,480	2,490	13,118	465	184
279,1	4,321	0,320	2,321	15,182	540	214
282	3,570	0,270	1,920	12,926	558	221
287,7	3,190	0,230	1,710	11,844	570	226
290,5	2,041	0,233	1,137	7,505	591	234
293,6	2,542	0,514	1,528	8,491	596	236

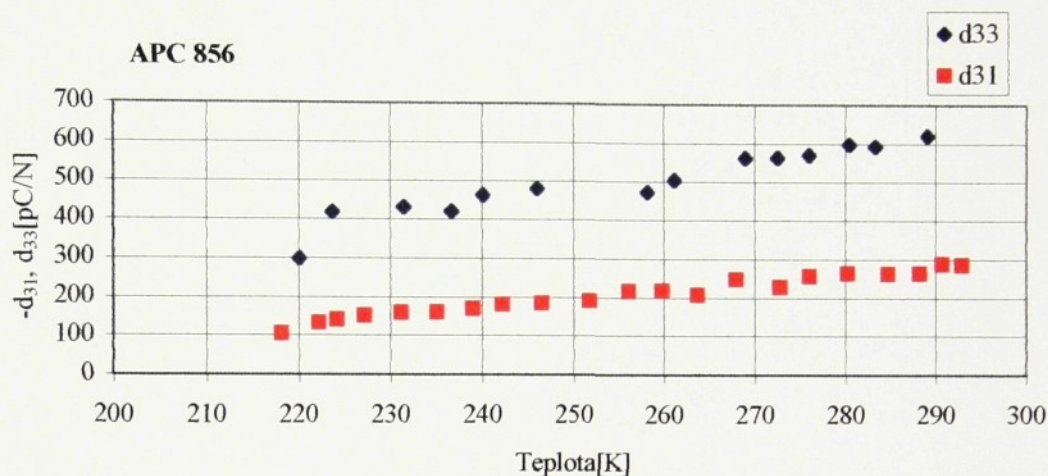
Graf teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů d_{31} a d_{33} pro vzorek APC 840
(Příloha č.2, 6)



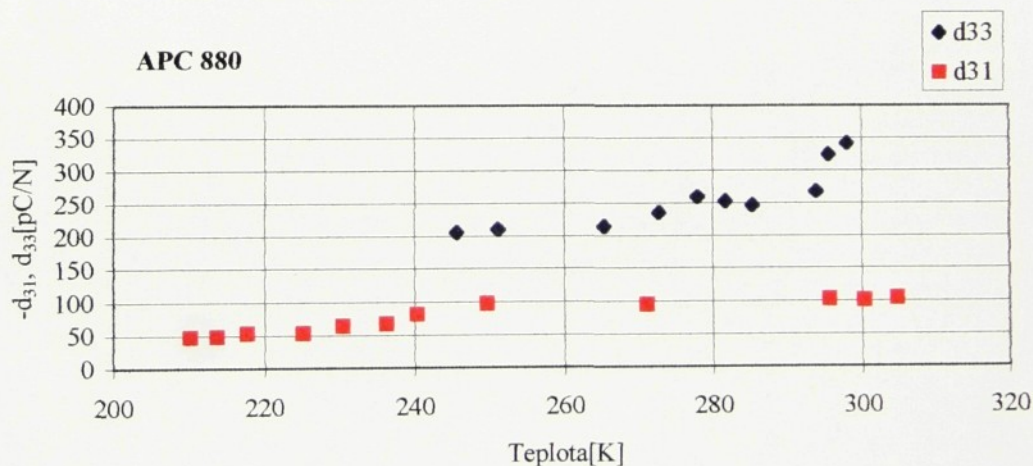
Graf teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů d_{31} a d_{33} pro vzorek APC 850
(Příloha č.2, 6)



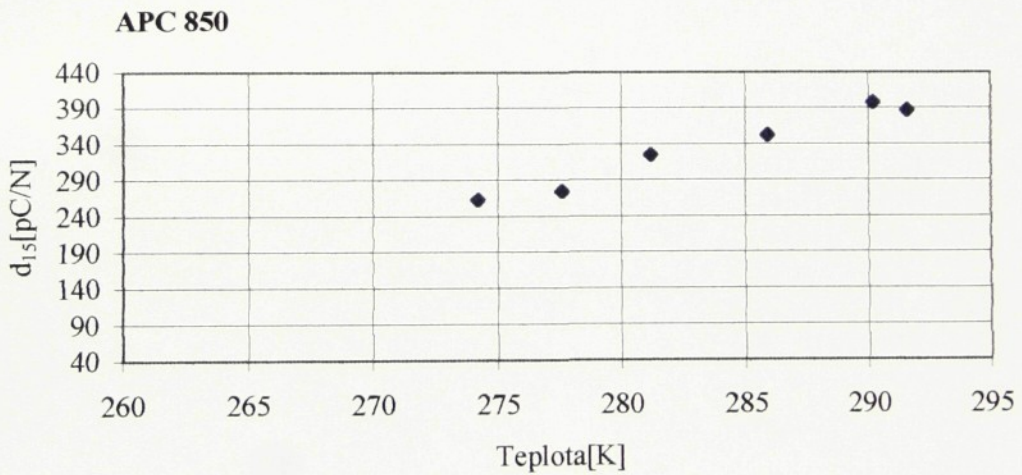
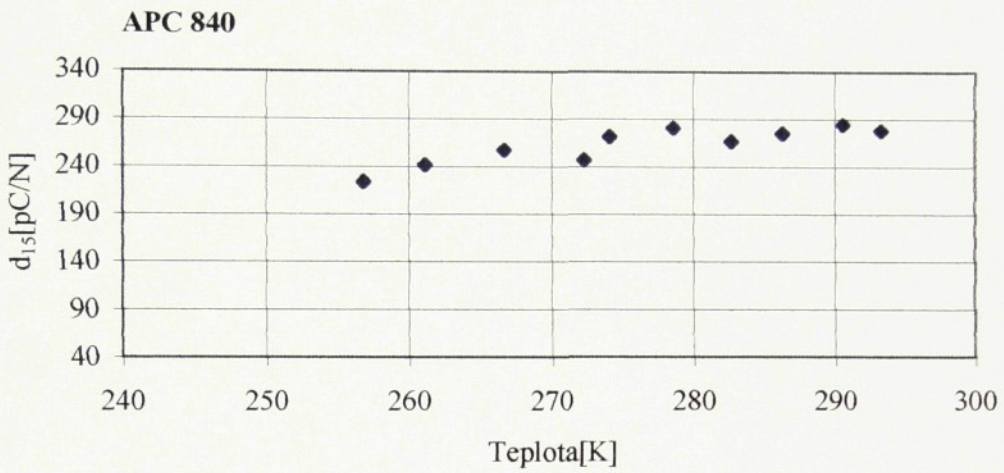
Graf teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů d_{31} a d_{33} pro vzorek APC 856
(Příloha č.3,.7)



Graf teplotních závislostí piezoelektrických koeficientů d_{31} a d_{33} pro vzorek APC 880
(Příloha č.4,.8)



Grafy teplotních závislostí piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorků APC 840 a APC 850
(Příloha č.10)



Grafy teplotních závislostí piezoelektrického koeficientu d_{15} vzorků APC 856 a APC 880
(Příloha č.11)

