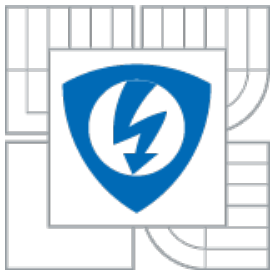




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

CHOVÁNÍ FERROELEKTRIK V ELEKTRICKÉM POLI

BEHAVIOUR OF FERROELECTRICS IN AN ELECTRIC FIELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

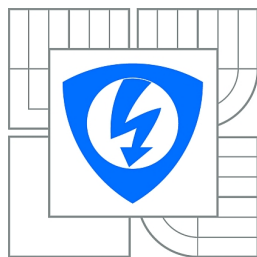
JOSEF KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Josef Krejčí

ID: 109681

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Chování feroelektrik v elektrickém poli

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti a použití feroelektrických materiálů nacházejících uplatnění v elektrotechnickém a elektronickém průmyslu. Zaměřte se zejména na jejich chování v elektrickém poli o různých intenzitách a na možné diagnostické metody.

S přihlédnutím k dostupnému přístrojovému vybavení inovujte laboratorní pracoviště pro zjišťování vlastností feroelektrických materiálů v elektrickém poli a ověřte jeho funkčnost. K dané problematice vytvořte elektronický text použitelný jako návod pro laboratorní cvičení.

Na vybraných vzorcích feroelektrik proměřte teplotní a napěťové závislosti složek komplexní permitivity a získané výsledky vyhodnoťte z pohledu probíhajících polarizačních mechanismů a elektrického stavu materiálu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Předložená práce popisuje vlastnosti a použití ferroelektrických materiálů nacházejících uplatnění v elektrotechnickém a elektronickém průmyslu. Práce je zaměřena zejména na jejich chování v elektrickém poli o různých intenzitách a na možných diagnostických metodách. Jako nejvhodnější měřicí metoda je zvolena metoda pomocí osciloskopu, která je v práci detailněji popsána. Měřicí laboratorní pracoviště pro zjišťování vlastností ferroelektrických materiálů v elektrickém poli bylo s dostupným přístrojovým vybavením inovováno, následně jeho funkčnost ověřena a na vybraných vzorcích ferroelektrik byla proměřena teplotní a napěťová závislost složek komplexní permitivity a elektrického stavu materiálu. K dané problematice byl také vytvořen elektronický text použitelný jako návod pro laboratorní cvičení, který je nedílnou součástí této práce.

Abstract:

The submitted thesis describes characteristics and use of ferroelectric materials which find their utilization in electrotechnical and electronics industry. The thesis is mainly aimed at their behaviour in the electrical field at various intensity and also focuses on their diagnostic methods. The method using an oscilloscope is selected as the most suitable and described here in more detail. Measuring laboratory workplace for detection of characteristics of ferroelectric materials in the electrical field has been innovated with available equipment and then its utility has been verified. Temperature and electric tension dependence of components of complex permittivity and electric condition of the material has been scaled using selected samples of ferroelectrics. A text in an electronic form has been integral part of the thesis. The text can be used as an instruction manual for laboratory trainings.

Klíčová slova:

Feroelektrika, dielektrika, polarizace, Curieova teplota, titaničitan barnatý

Keywords:

Ferroelectrics, dielectric, polarization, Curie temperature, barium titanite

Bibliografická citace díla:

KREJČÍ, J. *Chování feroelektrik v elektrickém poli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	- 9 -
1 TEORETICKÁ ČÁST	- 10 -
1.1 Dielektrické materiály.....	- 10 -
1.1.1 Základní vlastnosti a veličiny dielektrik.....	- 10 -
1.1.2 Relativní permitivita.....	- 11 -
1.1.3 Vnitřní rezistivita.....	- 12 -
1.1.4 Povrchová rezistivita	- 12 -
1.1.5 Dielektrické ztráty.....	- 12 -
1.1.6 Elektrická pevnost.....	- 14 -
1.1.7 Polarizace dielektrika	- 14 -
1.1.8 Komplexní permitivita.....	- 14 -
1.2 Feroelektrické materiály.....	- 16 -
1.2.1 Základní charakteristiky feroelektrik.....	- 16 -
1.2.2 Curieova teplota	- 16 -
1.2.3 Spontánní polarizace.....	- 17 -
1.2.4 Součinitel nelinearity	- 18 -
1.2.5 Titaničitan barnatý.....	- 19 -
1.2.6 Piezoelektrika.....	- 20 -
1.2.7 Pyroelektrika	- 21 -
1.2.8 Antiferoelektrika	- 21 -
1.2.9 Elektrety.....	- 22 -
1.3 Použití feroelektrických materiálů	- 22 -
1.3.1 Feroelektrické kondenzátory.....	- 22 -
1.3.2 Pyroelektrický detektor	- 23 -
1.3.3 Paměťové obvody	- 23 -
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 26 -
2.1 Měřené vzorky feroelektrik.....	- 26 -
2.2 Měřící metoda	- 26 -
2.3 Postup měření	- 28 -
2.4 Výsledky měření.....	- 29 -
3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	- 35 -
4 ZÁVĚR	- 36 -
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	- 37 -
6 PŘÍLOHA	- 38 -

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Základní veličiny dielektrických materiálů.....	- 11 -
Tab. 2: Vlastnosti měřených vzorků.....	- 26 -
Tab. 3: Vypočítané hodnoty součinitele nelinearity pro vzorek BaTiO ₃	- 29 -
Tab. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 23,8$ °C	- 30 -

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Paralelní náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem	- 13 -
Obr. 2: Sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem	- 13 -
Obr. 3: Grafická vyjádření komplexní permitivity	- 15 -
Obr. 4: Hysterezní smyčka: závislost polarizace feroelektrického vzorku na elektrickém poli	- 17 -
Obr. 5: Průběh závislosti $\varepsilon' = f(E)_{U=konst}$	- 18 -
Obr. 6: Elementární buňka paraelektrického BaTiO ₃	- 19 -
Obr. 7: Postupná změna krystalografických modifikací BaTiO ₃ na teplotě	- 20 -
Obr. 8: Schéma pyroelektrického detektoru [1]	- 23 -
Obr. 9: Schéma vložení a čtení informace elektrickým způsobem [1]	- 24 -
Obr. 10: Základní zapojení měřící metody	- 26 -
Obr. 11: Hysterezní smyčka	- 28 -
Obr. 12: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 40,1$ °C	- 31 -
Obr. 13: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 120$ °C	- 31 -
Obr. 14: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 130$ °C	- 32 -
Obr. 15: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 150$ °C	- 32 -
Obr. 16: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 40,1$ °C	- 33 -
Obr. 17: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 120$ °C	- 33 -
Obr. 18: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 130$ °C	- 34 -
Obr. 19: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 150$ °C	- 34 -

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	(m)	obvod efektivní plochy měřící elektrody
c	(m)	vzdálenost mezi měřící a ochranou elektrodou
C	(F)	elektrická kapacita
C_0	(F)	geometrická kapacita
C_x	(F)	kapacita měřeného kondenzátoru
C_{cw}	(K)	Curieho – Weissova konstanta
\vec{D}	(C m ⁻²)	vektor elektrické indukce
d	(m)	průměr měřící elektrody
\vec{E}	(V m ⁻¹)	vektor elektrického pole
\vec{E}_c	(V m ⁻¹)	vektor koercitivního pole
E_{pev}	(V m ⁻¹)	elektrická pevnost
ε^*	(-)	komplexní permitivita
$\varepsilon', \varepsilon''$	(-)	reálná, imaginární složka komplexní permitivity
ε_0	(F m ⁻¹)	absolutní permitivita vakua (8,854.10 ⁻¹² F m ⁻¹)
$\varepsilon_s, \varepsilon_\infty$	(-)	statická permitivita, optická permitivita
h	(m)	tloušťka měřeného materiálu
K_{\sim}	(-)	součinitel nelinearity
\vec{P}	(C m ⁻²)	vektor elektrické polarizace
\vec{P}_s	(C m ⁻²)	vektor spontánní polarizace
\vec{P}_r	(C m ⁻²)	vektor remanentní polarizace
Q	(-)	činitel jakosti
ρ_p	(Ω)	povrchová rezistivita
ρ_v	(Ω m)	vnitřní rezistivita
R	(Ω)	elektrický odpor
R_v	(Ω)	vnitřní odpor
R_{pov}	(Ω)	povrchový odpor
S_{ef}	(m ²)	efektivní plocha měřící elektrody
τ	(s)	relaxační doba
T_c	(°C)	Curieova teplota
$tg\delta$	(-)	ztrátový činitel

U_n	(V)	elektrické napětí na vzorku
U_x	(V)	vstupní elektrické napětí
ν	(°C)	teplota
ω	(rad s ⁻¹)	úhlová frekvence
φ	(°)	fázový úhel

Úvod

V posledních letech byl zaznamenán významný pokrok v oblasti fyziky feroelektrických materiálů, které v určitém teplotním oboru vykazují spontánní polarizaci. Tyto látky nacházejí v současné době významné uplatnění v nejrůznějších technických oborech, a proto je jejich studiu věnována značná pozornost.

Feroelektrické materiály se vyznačují spontánní polarizací, jejíž směr je možné měnit vnějším elektrickým polem. Feroelektrický materiál musí mít tedy několik základních směrů spontánní polarizace. Ve feroelektrických krystalech lze potom pozorovat takzvané domény – oblasti krystalu, v nich má spontánní polarizace jednotný směr a doménové stěny – hranice mezi doménami. Vlivem vnějšího elektrického pole může docházet k pohybům doménových stěn a tedy i ke změnám vnitřní doménové struktury krystalu, která má za následek změnu efektivních vlastností příslušného materiálu.

Feroelektrika patří do širší skupiny piezoelektrických materiálů, kde je vnějším mechanickým zatížením v těchto materiálech indukována polarizace a naopak působením vnějšího elektrického pole se projeví mimo jiné i deformací materiálu. Feroelektrické materiály tedy obecně vykazují vzájemnou závislost elektrických a mechanických veličin. Kromě uvedených piezoelektrických vlastností je možno u feroelektrik pozorovat další zajímavé vlastnosti jako jsou pyroelektrické nebo optoelektrické vlastnosti.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Dielektrické materiály

1.1.1 Základní vlastnosti a veličiny dielektrik

Dielektrikum je látka, která má po vložení do elektrického pole schopnost tvorby a existence vlastního vnitřního elektrického pole. Tohoto jevu se využívá zejména u kondenzátorů, ve smyslu schopnosti akumulovat elektrickou energii. [7]

Dielektrikum se skládá z atomů, molekul a iontů. Uvažujeme-li ideální dielektrikum (izolant), víme, že obsahuje jen vázané elektrické náboje a vyznačuje se velkou elektrickou pevností. Ve skutečnosti se však setkáme pouze s reálnými dielektriky (izolanty). Reálné dielektrikum obsahuje kromě vázaných elektrických nábojů i elektrické náboje volné, které jsou schopny se pohybovat. Jedná se tedy o látku s určitou, zpravidla velmi malou elektrickou vodivostí. [7]

Často bývají zaměňovány pojmy „dielektrikum“ a „izolant“. Někdy se tyto pojmy považují za ekvivalentní, přitom se ale jedná o dvě skupiny materiálů, jejichž vlastnosti se mohou podstatně lišit. Pojem „dielektrikum“ chápeme ve vztahu s polarizovatelností částic a se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii (kondenzátor). „Izolant“ je materiál mající vlastnost zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Přes tyto rozdíly spolu pojmy dielektrikum a izolant souvisí. Každý izolant je dielektrikem, opak však obecně neplatí. [7]

V závislosti na jejich vnitřní struktuře dělíme dielektrika na polární a nepolární. Polární dielektrikum je látka, která obsahuje ve svém objemu permanentní elementární dipólové momenty, i bez působení vnějšího elektrického pole. Existence dipólových momentů je dána strukturou látky. Strukturu látek tvoří molekuly, polárnost či nepolárnost molekuly souvisí s prostorovým uspořádáním, vztahy mezi jednotlivými atomy a typem vazby. [7]

Tab. 1: Základní veličiny dielektrických materiálů

základní el. veličiny	symbol	jednotka
relativní permitivita	ε'	(-)
vnitřní rezistivita	ρ_v	(Ω m)
povrchová rezistivita	ρ_p	(Ω m)
ztrátový činitel	$tg\delta$	(-)
elektrická pevnost	E_{pev}	(V m ⁻¹)
komplexní permitivita	$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$	(-)

1.1.2 Relativní permitivita

Relativní permitivita ε' je definována jako poměr kapacity elektrodového systému v prostoru zcela zaplněném příslušným dielektrikem a kapacity stejně uspořádaného elektrodového systému ve vakuu. Při výpočtu relativní permitivity se vychází z měření kapacit dvou deskových kondenzátorů a to z poměru

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (1)$$

kde C_x je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem a C_0 kapacita geometricky shodného vakuového kondenzátoru. Geometrická kapacita C_0 se zpravidla neměří, ale počítá z rozměru kondenzátoru podle vztahu

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S_{ef}}{h}, \quad (2)$$

kde ε_0 je absolutní permitivita vakua, S_{ef} je efektivní plocha měřící elektrody a h je vzdálenost elektrod, resp. tloušťka měřeného materiálu. Plochu elektrody spočítáme ze vztahu

$$S_{ef} = \pi \frac{(d+c)^2}{4}, \quad (3)$$

kde d je průměr měřící elektrody a c je vzdálenost mezery mezi měřící a ochrannou elektrodou.

1.1.3 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita materiálu ρ_v se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř vzorku. Měření vnitřní rezistivity se převádí na měření vnitřního odporu R_v . Vnitřní rezistivita se potom počítá z rozměrů vzorku (elektrodového systému) a vnitřního odporu dle vztahu

$$\rho_v = R_v \frac{S_{ef}}{h}, \quad (4)$$

kde R_v je vnitřní elektrický odpor, S_{ef} efektivní plocha měřící elektrody (3) a h tloušťka materiálu.

1.1.4 Povrchová rezistivita

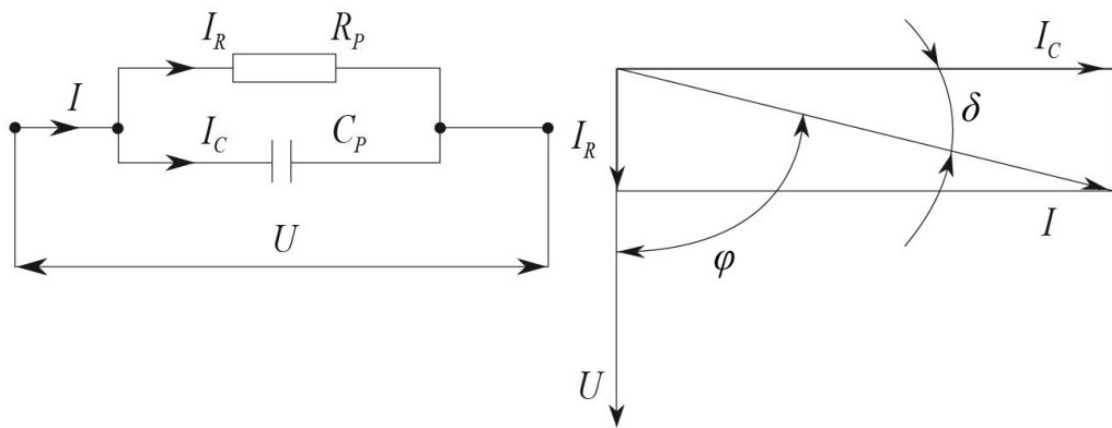
Povrchová rezistivita materiálu ρ_p se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. Obdobně se z měřeného povrchového odporu R_{pov} vypočítá povrchová rezistivita ρ_p podle následujícího vztahu

$$\rho_p = R_{pov} \frac{a}{c}, \quad (5)$$

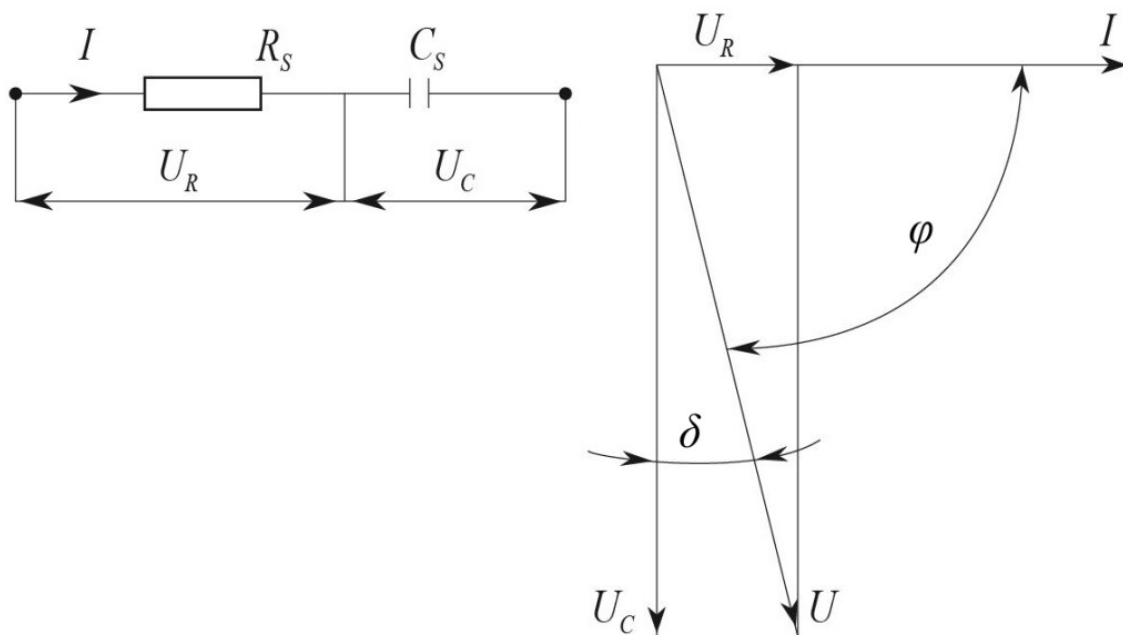
kde R_{pov} je povrchový elektrický odpor, a obvod efektivní plochy měřící elektrody a c je vzdálenost mezi ochranou a měřící elektrodou.

1.1.5 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou ztráty energie, které vznikají v dielektriku účinkem elektrického pole, tj. elektrickou vodivostí a některými druhy polarizací. Dielektrické ztráty vznikají po připojení kondenzátoru s technickým dielektrikem ke zdroji elektrického napětí. Připojením střídavého napětí na kondenzátor dojde k tomu, že proud předbíhá napětí o fázový úhel φ , který je menší než 90° . Ztrátový úhel δ vyjadřuje míru nedokonalosti každého dielektrika a odečítá se od 90° pro zjištění fázového úhlu. Dielektrické ztráty se dělí podle podstaty na vodivostní, polarizační a ionizační ztráty. Ztrátový činitel $\operatorname{tg}\delta$ lze vyjádřit pomocí prvků R , C sériového či paralelního náhradního zapojení dielektrika:



Obr. 1: Paralelní náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem



Obr. 2: Sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem

U paralelního náhradního zapojení obr. 1 se ztrátový činitel vypočítá podle vztahu

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}, \quad (6)$$

kde C_p je kapacita v paralelním náhradním zapojení, R_p odpor v paralelním náhradním zapojení a ω úhlová frekvence.

U sériového náhradního zapojení obr. 2 se ztrátový činitel vypočte podle vztahu

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s, \quad (7)$$

kde C_s je kapacita sériového náhradního zapojení, R_s odpor sériového náhradního zapojení a ω je úhlová frekvence.

1.1.6 Elektrická pevnost

Izolant je elektricky namáhán, jestliže na něj působí elektrické pole. Dosáhne-li gradient elektrického pole v jistém místě izolantu kritickou hodnotu, vznikne v izolantu výboj, ten způsobí v izolantu vznik dokonalé vodivé cesty a průchod proudu touto cestou. Veličina, kterou se vyjadřuje schopnost látky zachovávat svůj elektroizolační stav, se nazývá elektrická pevnost E_{pev} , jež je definována vztahem

$$E_{pev} = \frac{U_p}{h}, \quad (8)$$

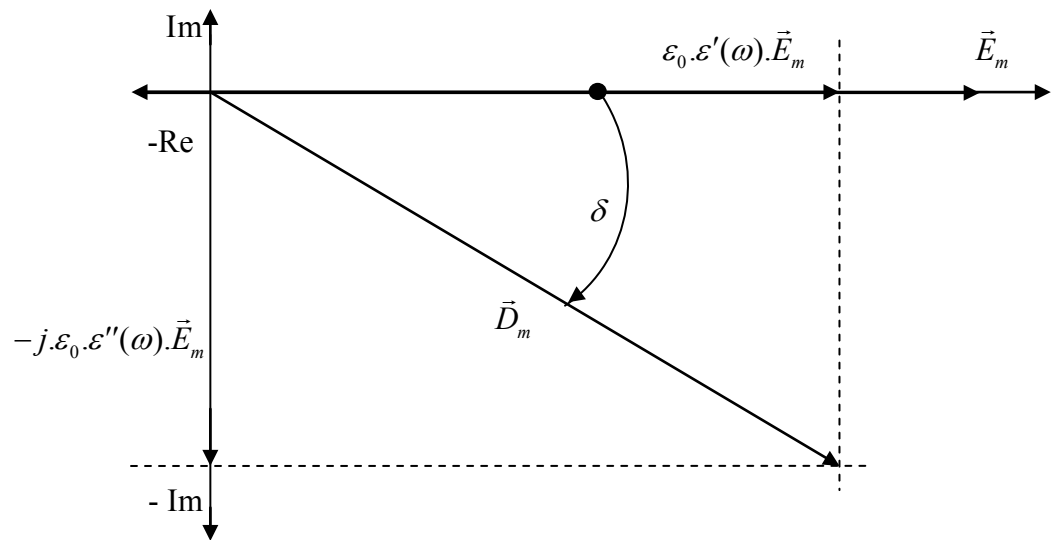
kde U_p je průrazné napětí a h je tloušťka izolantu v místě průrazu. [5]

1.1.7 Polarizace dielektrika

Fyzikální jev, při kterém se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemísťují elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových na malé omezené vzdálenosti a obsahuje-li látka dipólové molekuly, natáčí se tyto molekuly do směru pole. Příčinou polarizace jsou výjimečně i volné náboje.

1.1.8 Komplexní permitivita

Vlastnosti dielektrik ve střídavém elektrickém poli se vyjadřují pomocí komplexní permitivity. Komplexní permitivita ε^* se skládá ze dvou složek. Reálná složka komplexní permitivity ε' , která je mírou kapacitního charakteru dielektrika, se často označuje jako relativní permitivita. Imaginární složka komplexní permitivity ε'' , která je úměrná celkovým dielektrickým ztrátám ve střídavém elektrickém poli, se nazývá ztrátovým číslem.



Obr. 3: Grafická vyjádření komplexní permitivity

Komplexní permitivita je frekvenčně závislá veličina a uvádí se podle Debyeho teorie

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (9)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2}, \quad (12)$$

kde ε_s je statická permitivita pro $f \rightarrow 0$, ε_∞ je optická permitivita pro $f \rightarrow \infty$ a τ je relaxační doba. [5]

1.2 Feroelektrické materiály

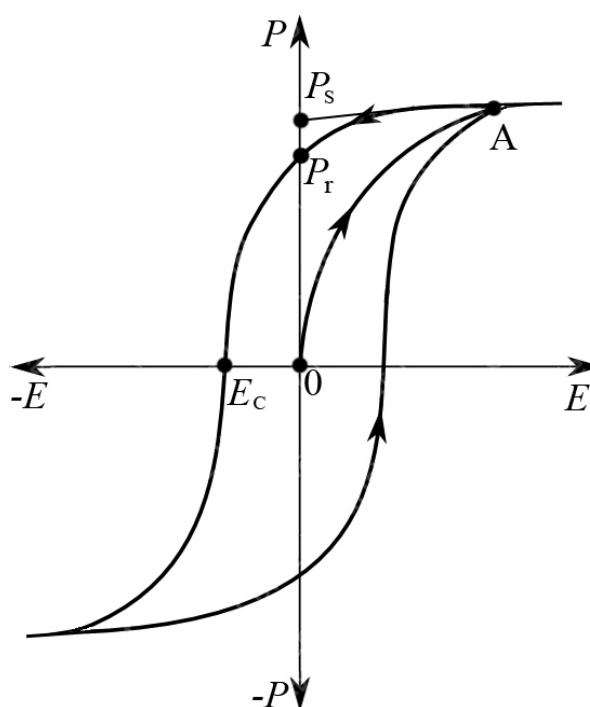
1.2.1 Základní charakteristiky feroelektrik

Dielektrické látky, jež jsou v jistém teplotním oboru spontánně polarizovány, aniž je k nim přiloženo vnější elektrické pole, nazýváme pyroelektrika. U některých pyroelektrik lze směr vektoru spontánní polarizace \vec{P}_s změnit např. vnějším elektrickým polem. Jsou to právě feroelektrické materiály (feroelektrika), které se touto vlastností vyčleňují ze širší skupiny pyroelektrik, charakterizovaných pouze spontánní polarizací.

Největší zvláštností feroelektrik je vysoká hodnota relativní permitivity ϵ' a nelineární závislost jejich polarizace \vec{P} na intenzitě vnějšího elektrického pole \vec{E} a existence hysterezní smyčky při přepolarizování. Charakteristický průběh prvotního polarizování a hysterezní smyčka jsou znázorněny na obr. 4. Při prvotním polarizování se polarizace feroelektrik mění podle křivky OA. V bodu A je vzorek plně polarizován. Proto v silnějších polích roste polarizace lineárně, jako u paraelektrických látek. Dochází-li ke snižování intenzity elektrického pole \vec{E} , nesleduje vektor polarizace křivku prvotní polarizace, ale je větší. Proto při $\vec{E} = 0$ zůstává látka částečně polarizována. Hodnota \vec{P}_r udává remanentní polarizaci. Zbytkovou polarizaci odstraníme, umístíme-li na vzorek pole opačného smyslu o intenzitě \vec{E}_c , označované jako koercitivní pole, nebo také jako koercitivní intenzita. Feroelektrické materiály jsou charakterizující svými \vec{P}_s , \vec{P}_r a \vec{E}_c veličinami. Jejich hodnoty jsou však závislé nejen na typu materiálu, technologii výroby, ale i na jeho čistotě a podmínkách polarizování, například teplotě, tvaru a rozměru vzorku.

1.2.2 Curieova teplota

Feroelektrické látky jsou charakterizovány určitou teplotou T_c kterou nazýváme Curieovou teplotou, Curieovým bodem nebo teplotou feroelektrického fázového přechodu. Tato teplota odděluje feroelektrický stav od stavu paraelektrického, v níž látka není spontánně polarizována. Oba stavy se od sebe liší krystalografickou symetrií. Paraelektrický stav existuje obvykle při vyšších teplotách než fáze feroelektrická. Feroelektrika při teplotách blízkých T_c jsou silně dielektricky nelineární a mají vysokou hodnotu relativní permitivity.



Obr. 4: Hysterezní smyčka: závislost polarizace feroelektrického vzorku na elektrickém poli

1.2.3 Spontánní polarizace

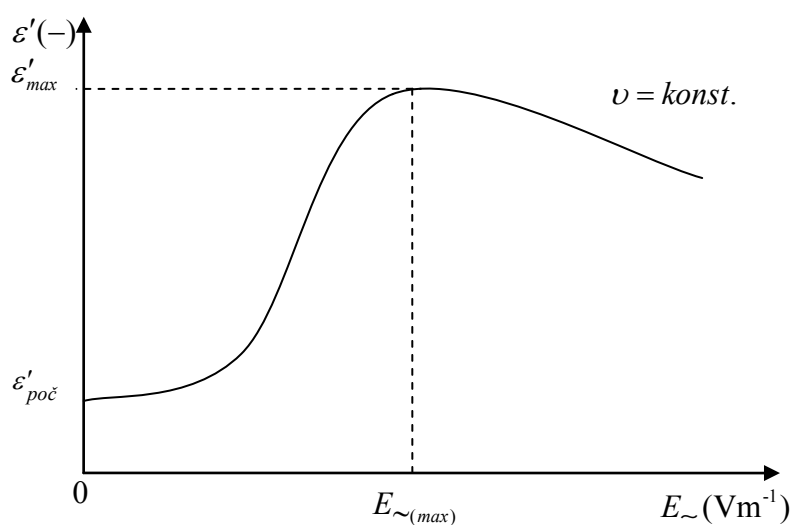
Spontánní (samovolná) polarizace se vyskytuje u látek, které mají doménovou strukturu. Velkou roli v případě spontánní polarizaci hraje kmitočet, intenzita elektrického pole a především teplota. Díky tepelnému pohybu mohou částice slabě vázané překonávat snadno potenciálové bariéry mezi jednotlivými možnými polohami. Bez přítomnosti elektrického pole k polarizaci nemůže dojít. Tepelný pohyb nosičů je chaotický a všechny možné polohy nosičů jsou tedy stejně pravděpodobné a nedochází k jejich nerovnoměrnému rozložení. Přiložením elektrického pole změním poměry – výšky potenciálových bariér do té míry, že se určité polohy nosičů náboje stanou energeticky výhodnějšími (pravděpodobnějšími). Docílíme toho, že rozložení nosičů je v jednotce objemu nerovnoměrné, vznikne asymetrie a jednotka objemu dielektrika získá dipólový moment. Získáním dipólového momentu dojde k přeorientování do směru tohoto pole. Spontánní polarizace se vyznačuje, že po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a obdobně – polarizace pomalu ubývá po odpojení pole. Doba potřebná k ustálení těchto jevů je relativně dlouhá. Po skončení působení elektrického pole se nosiče vrátí do svých původních poloh vlivem jejich tepelného pohybu. Tato polarizace je provázána ztrátami energie v dielektriku, které se tímto ohřívají. Grafické znázornění závislosti spontánní polarizace na intenzitě vnějšího elektrického pole u feroelektrických látek tvoří hysterezní smyčka. [3]

1.2.4 Součinitel nelinearity

Dielektrické vlastnosti látek feroelektrické soustavy jsou výrazně závislé i na intenzitě působícího střídavého elektrického pole. Při malých intenzitách střídavého elektrického pole nedochází v soustavě domén feroelektrika k pohybu doménových stěn, úroveň polarizace je tedy relativně nízká. Počáteční úrovní polarizace odpovídá počáteční permitivita $\varepsilon'_{poč}$, kterou lze určit dle následujícího vztahu

$$\varepsilon' = \frac{C_{cw}}{T - T_c}, \quad (13)$$

kde C_{cw} je Curie – Weissova konstanta charakterizující danou látku.



Obr. 5: Průběh závislosti $\varepsilon' = f(E)_{\nu=konst}$

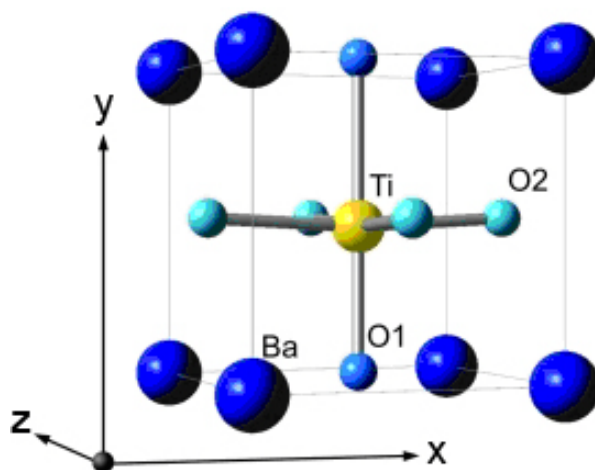
Při vzrůstu intenzity elektrického pole dochází postupně k přeskupování doménových hranic, polarizace feroelektrika se prudce zvyšuje a stejný charakter vykazuje i změna relativní permitivity. Při určité hodnotě intenzity elektrického pole se projeví stav nasycení, kdy se přepolarizují domény v celém objemu dané látky. Nad oblastí polarizace nasycení již další vzrůst intenzity elektrického pole nevyvolává žádné podstatné zvýšení polarizace; poměr P/E se zmenšuje a relativní permitivita klesá. Typický průběh závislosti $\varepsilon' = f(E)_{\nu=konst}$ feroelektrika je znázorněn na obr. 5. Z průběhu je patrná maximální hodnota permitivity ε'_{max} (13) při intenzitě $E_{\sim(max)}$.

Míru změn relativní permitivity při změnách intenzity elektrického pole vyjadřuje součinitel nelinearity

$$K_{\sim} = \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{poč}}. \quad (14)$$

Součinitel nelinearity K_{\sim} může u feroelektrik dosáhnout hodnoty až 100. Protože u feroelektrik jsou permitivity $\varepsilon'_{poč}$ a ε'_{max} , stejně i jako plocha $E_{\sim(max)}$ značně závislé na teplotě, je teplotně závislý i součinitel nelinearity. Závislost relativní permitivity na intenzitě přiloženého elektrického pole se využívá u skupiny keramických kondenzátorů, známe pod názvem varikondy.

1.2.5 Titaničitan barnatý



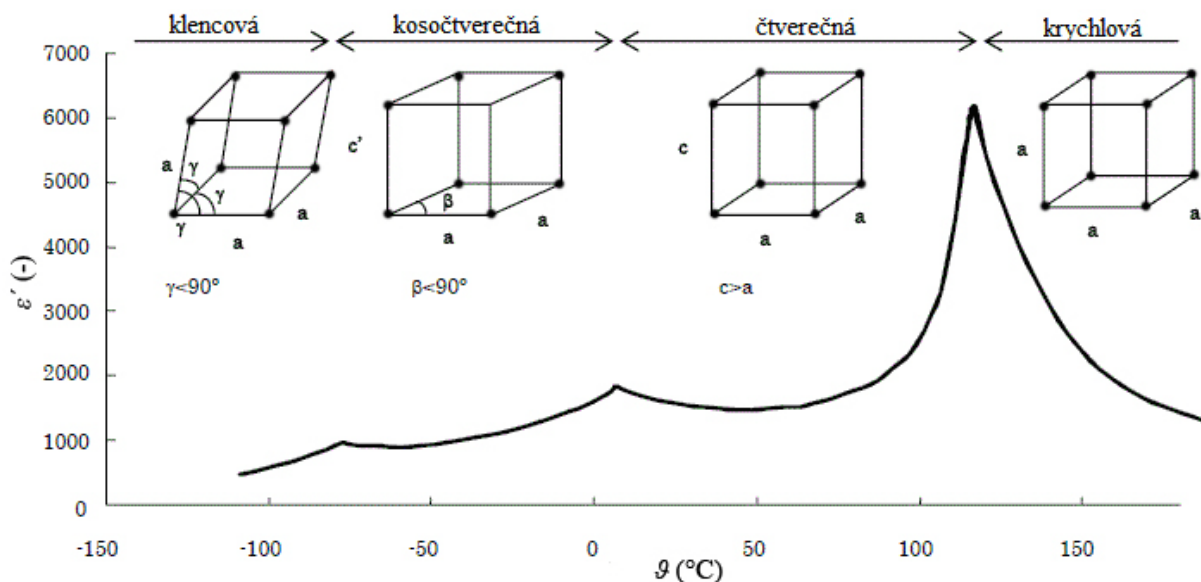
Obr. 6: Elementární buňka paraelektrického BaTiO₃

Titaničitan barnatý patří k nejvíce prozkoumaným feroelektrikům, jelikož má jednoduchou strukturu, umožňuje sledování fázových přechodů, feroelektrických a jiných vlastností při snadno dosažitelných teplotách. Lze jej připravit jako monokrystal i keramický materiál a využít v řadě aplikací v praxi. Pro fyzikální výzkum jsou vhodnější ve většině případů monokrystal BaTiO₃.

Pro přípravu monokrystalů byla v posledních letech vypracována řada metod. Za úspěšnou metodu lze považovat pěstování z dvousložkových nebo trojsložkových tavenin, kde je rozpouštědlem cizí látka. Do této kategorie patří metoda Blattnerova, při které se BaCO₃, respektive BaO, a TiO₂ rozpouští v tavenině BaCl₂ při teplotách nad 100 °C. Při pozvolném ochlazení vyrostou krystaly tvaru hranolků o délce asi 2 mm. Za nejúspěšnější vůbec je zatím metoda Remeikova, který navrhl pěstovat monokrystal z roztoku BaTiO₃

v tavenině KF při zvyšující se teplotě do cca 1200 °C. U velkých krystalů strana krystalu dosahuje délky až 2 cm. Výhodou takto pěstovaného krystalu BaTiO₃ je to, že vykazuje poměrně malá vnitřní pnutí a jednoduchou doménovou strukturu. Nevýhodou je jeho částečné znečištění tavidlem a materiálem kelímku. [1]

Titaničitan barnatý se vyskytuje ve čtyřech krystalografických modifikacích. Při teplotách do -100 °C má mřížku klencovou (trigonální). V rozmezí teplot od -100 °C do 0 °C je stabilní mřížka kosočtverečná. V teplotním rozmezí teplot 0 °C do 120 °C má mřížku čtverečnou a za vyšších teplot mřížku krychlovou. Postupná změna krystalografických modifikací je znázorněna na obr. 7. Přeměna z krychlové na čtverečnou mřížku při ochlazení, souvisí s přechodem z paraelektrického do ferroelektrického stavu. Protože rychlost difuze za teplot okolo 120 °C je zanedbatelná, musí se uvažovaná přeměna uskutečnit bez difuze, například vzájemným posuvem iontů vůči sobě.



Obr. 7: Postupná změna krystalografických modifikací BaTiO₃ na teplotě

1.2.6 Piezoelektrika

U některých speciálních pevných iontových krystalů, které nemají alespoň v jednom směru střed souměrnosti, může docházet k piezoelektrickému jevu. Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho mechanické deformaci.

Podstatou piezoelektrického jevu je, že krystal je tvořen molekulami, které v rovnovážném stavu mají dipól složený ze tří stejných vektorů, vzájemně svírajících úhel 120°. Vzhledem k symetrii je jejich výsledný dipólový moment sil molekuly nulový. Při zatížení tlakem nebo tahem ve směru rovnoběžném nebo kolmém vůči jedné ze tří složek

vznikne výsledný dipól. Obdobně elektrické pole, přiložené v jednom ze tří směrů vyvolá deformaci molekuly. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen SiO_2 . Křemen se hojně uplatňuje při výrobě piezoelektrických rezonátorů pro oscilátory. Jejich předností je vysoká časová stálost, malé ztráty vnitřním třením, jimž odpovídá vysoký činitel jakosti Q a poměrně malá teplotní závislost rezonančního kmitočtu v širokém rozmezí teplot.

1.2.7 Pyroelektrika

Pyroelektrické látky se vyznačují trvalou polarizací, která se mění při změně teploty. Krystalická látka trvale polarizována musí obsahovat molekuly, které mají trvalý dipól a v krystalu musí existovat alespoň jediný směr bez středu souměrnosti (nejméně jedna polární osa). Účinky trvalé polarizace se projevují jen ve směru polárních os. V těchto směrech se uplatňuje také pyroelektrický jev.

Pyroelektrický jev, tj. změna polarizace vyvolaná změnou teploty, se také vyskytuje u látek spontánně polarizovaných v malých objemech. Těmto malým objemům říkáme domény. Jestliže jsou vektory spontánní polarizace v rámci domén náhodně orientovány, je výsledný vektor polarizace nulový. Účinkem vnějšího elektrického pole, případně mechanického napětí, se vektory spontánní polarizace stáčíjí do směru působení elektrického pole, nebo směru mechanického namáhání. Jestliže zachováme dosažené usměrnění vektorů spontánní polarizace i po vymizení mechanického namáhání či pole, zůstane látka v příslušném směru trvale polarizována. Teplota, při níž trvalá polarizace vymizí, je označována jako Curieova teplota T_c .

Pyroelektrika jsou používána pro přeměnu teploty na elektrický signál v pyroelektrických detektorů. Principiálně lze pyroelektrika využít i k obrácenému jevu, který nazýváme elektrokolorický jev.

1.2.8 Antiferoelektrika

Antiferoelektrika jsou materiály, v nichž jsou dipóly uspořádány antiparalelně a nevytvářejí proto výsledný dipólový moment krystalu, tj. nemají spontánní polarizaci. Proto se také u nich nepozoruje hysterezní smyčka. V mnoha ohledech jsou však antiferoelektrika podobná feroelektrikům. Existuje u nich fázový přechod mezi stavem antiferoelektrickým a paraelektrickým. Symetrie antiferoelektrické fáze dovoluje existenci piezoelektrického stavu. Známá antiferoelektrika jsou např. PbZrO_3 , NaNbO_3 . [1]

1.2.9 *Elektrety*

Pod tímto označením jsou dnes míněna především trvale polarizována dielektrika. Princip přípravy elektretů poprvé popsal Eguchi. Zjistil, že některé druhy pryskyřic a vosků, které ztuhnou v dostatečně silném poli, zůstanou po ochlazení a vymizení pole polarizovány. Dlouhodobé sledování ukázalo, že polarizace se v průběhu času zmenšuje až na nevýznamnou hodnotu. Trvalejší polarizace lze dosáhnout využitím následujících jevů: orientací trvalých dipólů molekul, přerozdělením vlastních nosičů náboje uvnitř dielektrika a injekcí nosičů náboje z vnějšího prostředí.

Prvním z uvedených jevů může být realizován pouze u polárních dielektrik a byl využit již Eguchim. Druhý jev je podmíněn dostatečnou koncentrací nosičů náboje v dielektriku. Třetí jev je vhodný zejména pro nepolární dielektrika a je v současné době nejvíce používán. Elektrety z makromolekulárních látek jsou převážně vyráběny ve tvaru fólií. Fólie jsou průchodem mezi deskovými elektrodami zpolarizovány. Na elektrody je vloženo potřebné napětí vytvářející v prostoru mezi deskami pole dané intenzity. Polarizace se uskutečňuje buď za pokojových, nebo za zvýšených teplot. Ohřev usnadní orientaci dipólů molekul i elektrodiffuzi. Vnější pole vyvolá slabší injekci nosičů z elektrod a vzduchové mezery do povrchové vrstvy fólie. Při polarizaci za pokojové teploty jsou hlavním zdrojem polarizace injektované nosiče nábojů, a proto se musí použít silnějších polí než při polarizaci za tepla. Při tom se musí zamezit také vzniku výbojů, které způsobují erozi povrchu polarizované fólie. Toho se dosáhne vyloučením vzduchové mezery mezi povrchy fólie a elektrod. Fóliové elektrety se nejvíce uplatňují ve výrobě elektromechanických měničů (mikrofonů). [2]

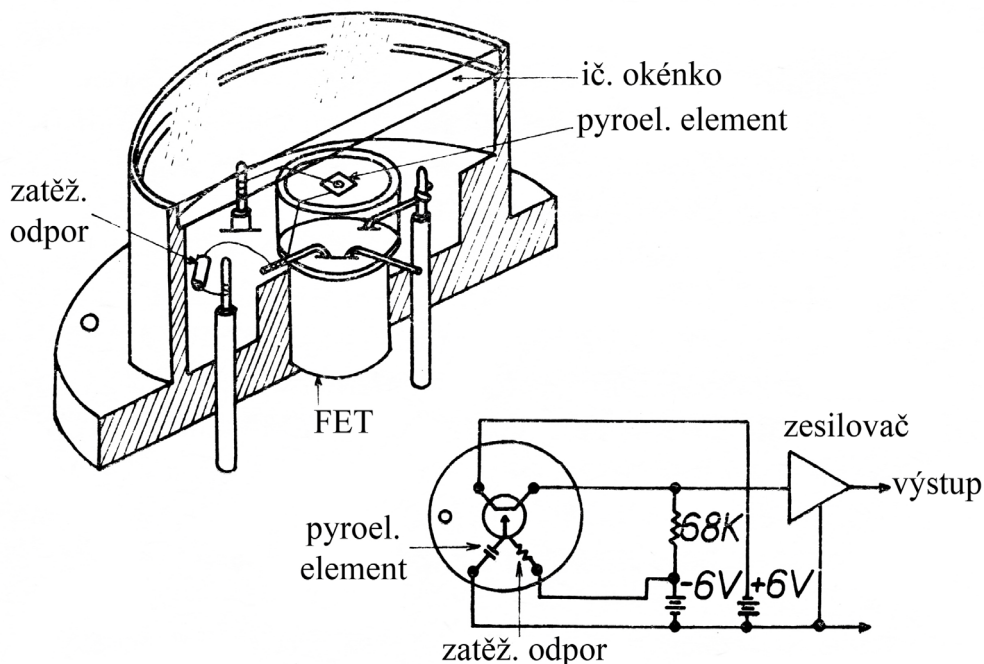
1.3 *Použití feroelektrických materiálů*

1.3.1 *Feroelektrické kondenzátory*

Vysoká hodnota relativní permitivity u některých druhů feroelektrik přispěla k miniaturizaci kondenzátorů. Především jsou zde využívány materiály, které lze připravit keramickou technologií. Většinou to jsou hmoty z titaničitanů, především BaTiO_3 . Při výběru dielektrického materiálu se z fyzikálních vlastností bere v úvahu především relativní permitivita a její teplotní a frekvenční průběh, teplotní závislost dielektrických ztrát a izolační odpor materiálu. Čistý titaničitan barnatý vykazuje vysokou hodnotu relativní permitivity okolo 10 000, ovšem jen v teplotním rozsahu několika stupňů v okolí fázového přechodu 120 °C. Širší teplotní oblast, asi 100 °C s vysokou hodnotou relativní permitivity okolo 4 000, lze získat u tuhých roztoků BaTiO_3 . Nevýhodou zmíněných materiálů jsou vyšší dielektrické ztráty $tg\delta$ kolem $200 \cdot 10^{-4}$. Feroelektrické kondenzátory se využívají hojně v slaboproudé elektrotechnice.

1.3.2 Pyroelektrický detektor

Pro detekci pohybu osob v prostoru jsou rozšířeny detektory absorbující záření z povrchu objektu, které nejčastěji pracují na pyroelektrickém principu. Na destičku feroelektrického krystalu vyříznutou kolmo k feroelektrické ose, opatřenou elektrodami na dvou větších plochách, dopadá infračervené záření a destičku ohřeje. V důsledku teplotní závislosti spontánní polarizace feroelektrika se na elektrodách objeví elektrický náboj, a jemu odpovídající elektrické napětí. Prostor, ve kterém je umístěno feroelektrické teplotní čidlo, je evakuován a od okolí oddělen okénkem propustným pro infračervené záření. Jako pyroelektrického prvku lze použít řezu krystalu BaTiO_3 . Pyroelektrický prvek použitý jako kondenzátor, je obvykle povlečen černou absorbující hmotou. V základním obvodu je dále tranzistor FET, zatěžovací odpor a zesilovač výstupního signálu, jak je uvedeno na obr. 8.

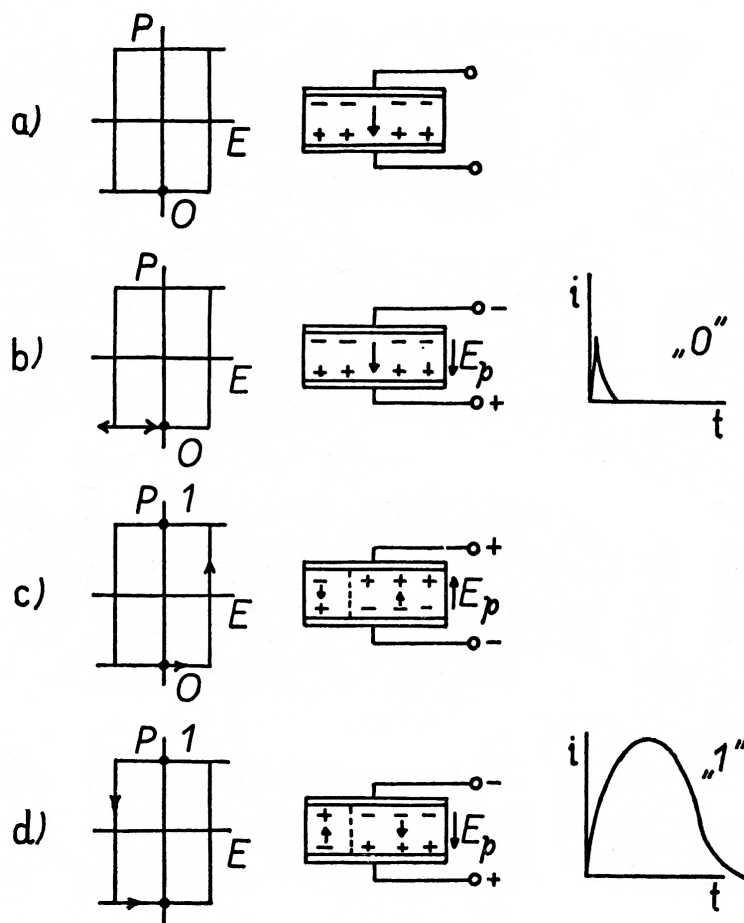


Obr. 8: Schéma pyroelektrického detektoru [1]

1.3.3 Paměťové obvody

Paměťové obvody slouží k trvalému nebo dočasnému uchovávání informací. Paměťové obvody s feroelektrickými materiály slouží k trvalému uchovávání informací. Pravoúhlá hysterezní smyčka u některých feroelektrik poskytuje možnosti k aplikačnímu výzkumu paměťových prvků, vhodných pro konstrukci složitých počítačových strojů. Tato zařízení

pracují ve dvojkové soustavě, tzn., že každá paměťová buňka musí být schopna zapamatovat si dvě následné informace. U feroelektrik těmto informacím odpovídají dva stavy spontánní polarizace. Na obr. 9 jsou označeny body 1 a 0.



Obr. 9: Schéma vložení a čtení informace elektrickým způsobem [1]

Paměťovou buňku lze sestavit obdobně jako feroelektrický kondenzátor. Informaci na ni ukládáme nebo ji načítáme pomocí pulsů elektrického pole E_p a velikosti, která právě postačí k převrácení spontánní polarizace. Informace ukládáme pomocí E_p různé polarity a načítáme je pomocí E_p stejné polarity. Princip načtení informace „0“ je znázorněno na obr. 9 a, b. a) necht' paměťová buňka je ve stavu 0. b) po přiložení krátkodobého pulsu E_p ve směru P_s (označena šipka v kondenzátoru) se stav 0 nezmění. Přitom lze indikovat, že kondenzátorem proteče malý proudový impuls, který je spojený se změnou indukované polarizace (informace „0“). Princip vložení informace je dále na obr. 9 c: přiložením pole E_p v opačném směru, než P_s , pak kondenzátor přejde z původního stavu 0 do stavu 1.

K načtení této informace použijeme pulsu E_p o stejné polaritě jako v případě b) to je znázorněno na obr. 9 d: v kondenzátoru dochází k depolarizaci, a proto lze indikovat elektrický proud ve tvaru vysokého proudového impulsu (informace „1“). Bohužel tímto načtením dojde k vymazání informace. Aby bylo možné ukládat velké množství informací na co nejmenší plochu feroelektrických materiálů, sestavují se z paměťových buněk matrice. K jejich konstrukci se obvykle používá tenkých výbrusů feroelektrických krystalů, např. BaTiO₃. Směr P_s je kolmý k velkým protilehlým plochám výbrusů. Tyto destičky se opatřují na velkých plochách rovnoběžnými proužky elektrod, vzájemně kolmými na dolní a horní ploše. V paměťových obvodech se na elektrody na dolní a horní ploše přikládají malé napěťové pulsy různé polarity. K uložení nebo načtení informací dojde jen v tom místě krystalu, ke kterému byly z obou stran současně přiloženy napěťové pulsy opačné polarity a tak bylo dosaženo potřebné hodnoty elektrického pole k polarizaci. Na matici o ploše 1 mm² lze vložit asi 1 000 dvojkových informací. Příkladná napětí při použití shora uvedených materiálů a při tloušťce matrice 0,1 mm se pohybuje kolem 5 – 10 V. Rychlost prepolarizace, s níž je spjata i rychlost načtení při uložení informace, je okolo 10 μs. Tyto parametry se zdají velice výhodné, ale tyto feroelektrika nenalezla u této aplikace široké využití. Hlavním důvodem je, že ke změně informace může bohužel dojít i vlivem podstatně nižšího elektrického pole, než je pracovní pole E_p . Stane se tak např., pokud přikládáme puls stejné polarity po mnohokrát na stejné místo matrice. [1]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Měřené vzorky feroelektrik

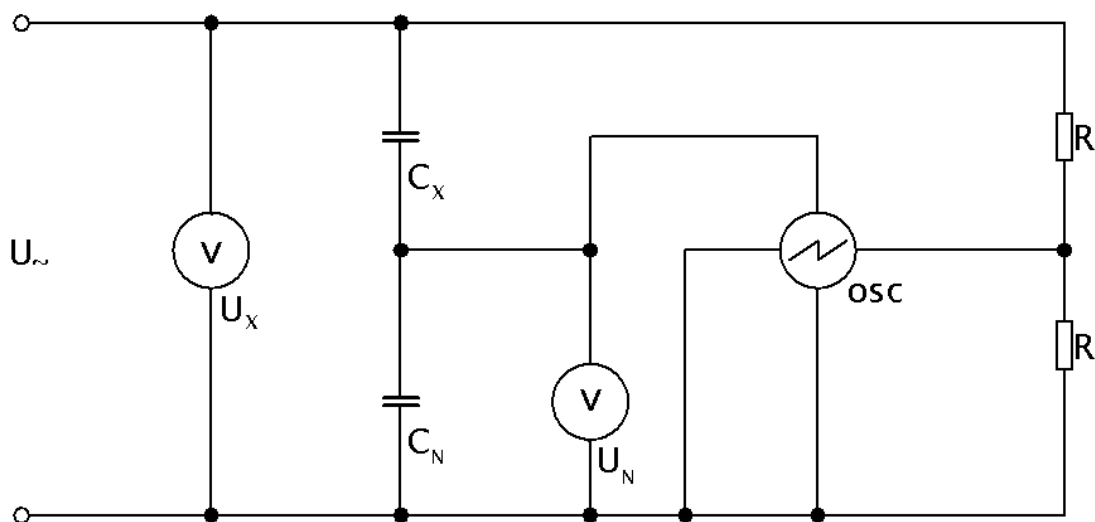
V této práci byly zkoumány celkem čtyři typy vzorků od firmy Noliac Ceramics, s.r.o., kde každý měřený vzorek měl jiné vlastnosti. Zkoumané vzorky byly dodány jen pod obchodními názvy bez bližších specifikací. Geometrické rozměry měřených vzorků i s jejich vypočítanou geometrickou kapacitou jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Vlastnosti měřených vzorků

číslo vzorku	označení vzorku	d (m)	h (m)	C_0 (pF)
1	BaTiO ₃	0,01500	0,00300	0,5215
2	P5000	0,02508	0,00494	0,8854
3	P8000	0,01300	0,00395	0,1867
4	P10000	0,01552	0,00148	1,8677

2.2 Měřící metoda

Pomocí osciloskopické metody lze určit ztrátový činitel $tg\delta$ a kapacitu kondenzátoru se zkoumaným vzorkem v širokém rozsahu hodnot intenzit elektrického pole i kmitočtů. Zapojení základního obvodu pro zobrazení hysterezní smyčky je na obr. 10.



Obr. 10: Základní zapojení měřící metody

Do série se vzorkem o kapacitě C_x je připojen kondenzátor o kapacitě C_n . Při splnění podmínky $C_n \gg C_x$ bude napětí na kondenzátoru C_n úměrné náboji na kondenzátoru C_x a vstupní napětí bude přibližně rovno napětí na vzorku C_x . Napětí z kondenzátoru C_n odpovídající náboji na vzorku je přivedeno na vertikální zesilovač osciloskopu. Na horizontální zesilovač je přivedeno vstupní napětí, tedy napětí na vzorku upravené odporovým děličem. Na obrazovce osciloskopu se zobrazí hysterezní smyčka obr. 11., která odpovídá vlastnostem použitého feroelektrického materiálu. Podmínky měření vlastností vzorku lze měnit změnou vstupního napětí U . [4]

K určení velikosti kapacity vzorku C_x je nutno stanovit měřítka na osách napětí a náboje.

Platí: $U \sim U_x$, $U_n \sim Q_x$

Vztah pro výpočet kapacity C_x

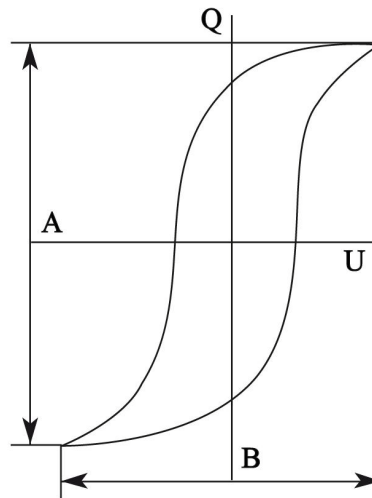
$$C_x = \frac{U_n C_n}{U_x} \quad (15) [4]$$

Relativní permitivitu ε' stanovíme dle vzorce (1), kde C_0 je geometrická kapacita vzorku vypočítaná z geometrických rozměrů vzorku podle vzorce (2) a (3), kde d (m) je průměr vzorku a h (m) je tloušťka vzorku.

Hodnotu ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ vypočteme dle vztahu

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{4S}{\pi AB} \quad (16) [4]$$

kde S (m²) je plocha vymezená hysterezní smyčkou. A , B jsou délky vymezuující podle obr. 11. rozměry hysterezní smyčky na osciloskopu.



Obr. 11: Hysterezní smyčka

2.3 Postup měření

V experimentální části byly měřeny dielektrické vlastnosti vzorků, které byly vloženy do olejového termostatu Medingen E5s a dostatečně vytemperovány při teplotách 24, 40, 60, 80, 100, 110, 120, 130, 140 a 150 °C. Na vstupní svorky bylo přiváděno elektrické napětí U_x o velikosti 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500 a 600 V při kmitočtu 50 Hz. Rozměry měřených vzorků i s jejich geometrickou kapacitou jsou uvedeny v tab. 2, kapacita normálového kondenzátoru byla $C_n = 4,25 \mu\text{F}$. Na zdroji bylo nastaveno vstupní elektrické napětí a na voltmetru Metrix MX554 byly odečteny postupně hodnoty napětí U_n a zapsány do tabulek níže. Pomocí osciloskopu ETC SCOPE M221 byla stanovena plocha hysterezní smyčky. Dále byla pomocí vztahu (15) spočítána velikost kapacity C_x , pomocí vzorce (2) spočítána velikost kapacity C_0 . Dle vzorce (1) byla spočtena relativní permitivita ε' a vzorcem číslo (16) ztrátový činitel $\text{tg}\delta$. Součinitel nelinearity K_{\sim} byl vypočítán jen pro měřený vzorek BaTiO_3 podle vzorce (14), výsledky jsou uvedeny v tab. 3. Příklady výpočtu jsou uvedeny pro první řádek vzorku BaTiO_3 v tab. 4, zbylé hodnoty jsou uvedeny v příloze. Část naměřených hodnot je zobrazeno níže v grafických závislostech, zbytek grafických závislostí je uveden v příloze.

$$C_x = \frac{U_n \cdot C_n}{U_x} = \frac{0,0225 \cdot 4,250 \cdot 10^{-6}}{50} = 1,913 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot h} = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\pi \cdot 0,015^2}{4 \cdot 0,003} = 5,215 \cdot 10^{-13} \text{ F}$$

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0} = \frac{1,913 \cdot 10^{-9}}{5,215 \cdot 10^{-13}} = 3668$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{4S}{\pi AB} = \frac{4.3945,17}{\pi \cdot 96,5 \cdot 138,2} = 0,377$$

$$K_{\sim} = \frac{\varepsilon'_{\max}}{\varepsilon'_{\text{poč}}} = \frac{25996}{2500} = 10,398$$

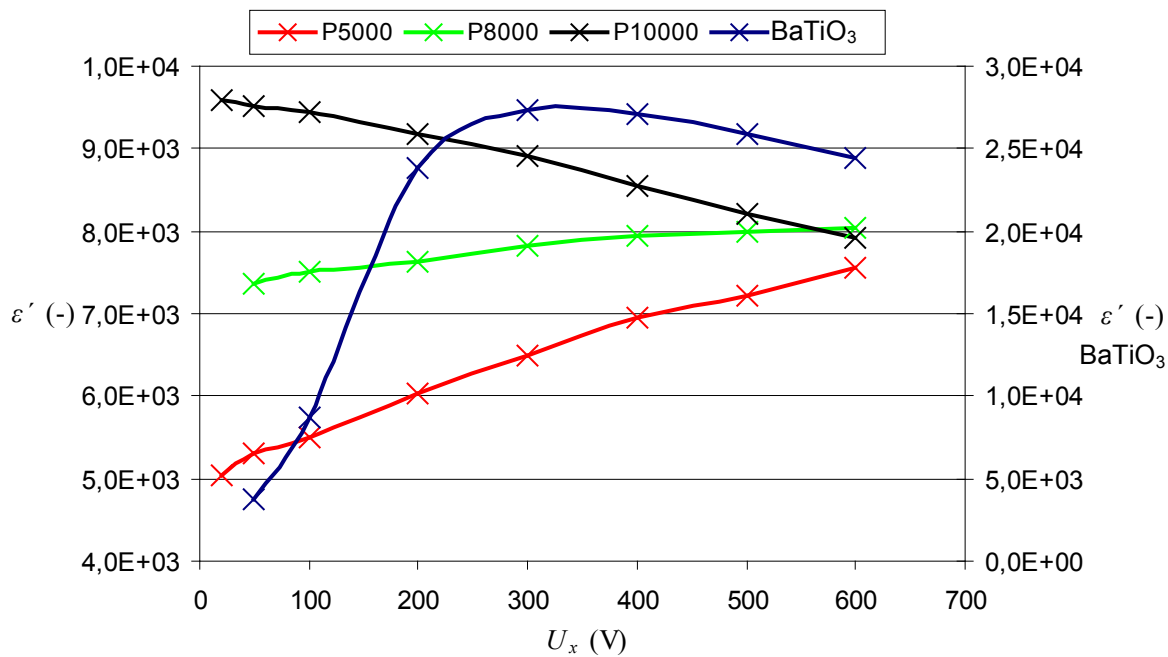
2.4 Výsledky měření

Tab. 3: Vypočítané hodnoty součinitele nelinearity pro vzorek BaTiO₃

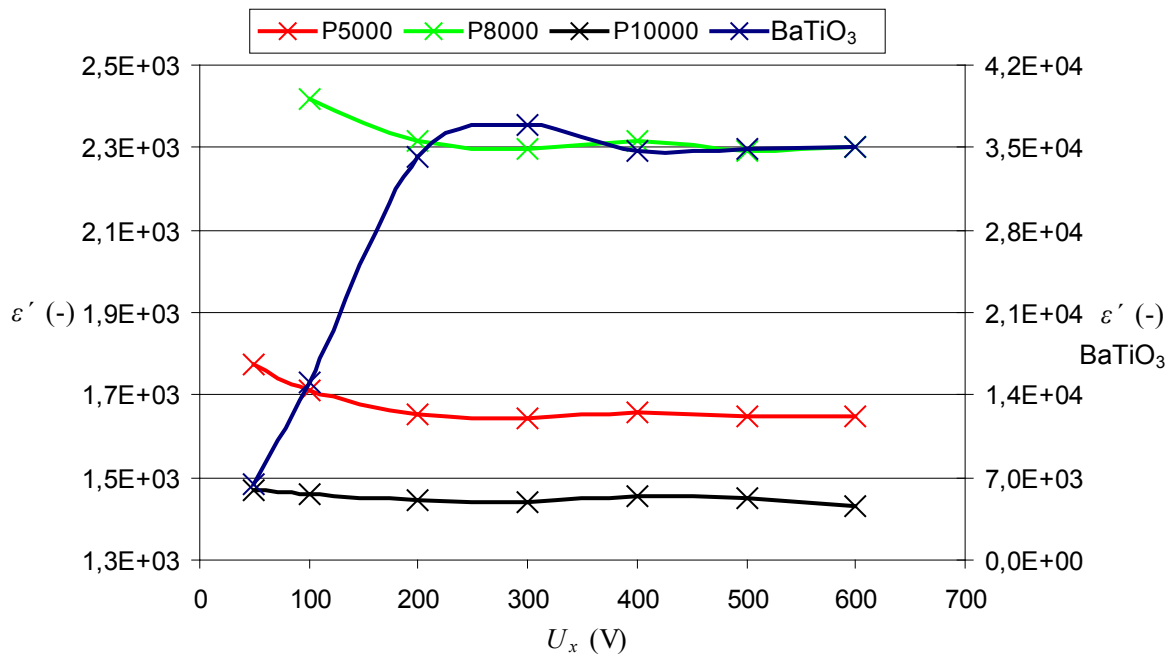
ν (°C)	$\varepsilon'_{\text{poč}}$ (-)	ε'_{\max} (-)	K_{\sim} (-)
23,8	2500	25996	10,398
40,1	2080	27283	13,117
60,1	1890	25933	13,721
80,1	1830	26395	14,423
100	1750	34907	19,947
110	1636	30190	18,454
120	1340	36945	27,571
130	12300	13122	1,067
140	8200	8330	1,016
150	6100	6025	0,988

Tab. 4: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$

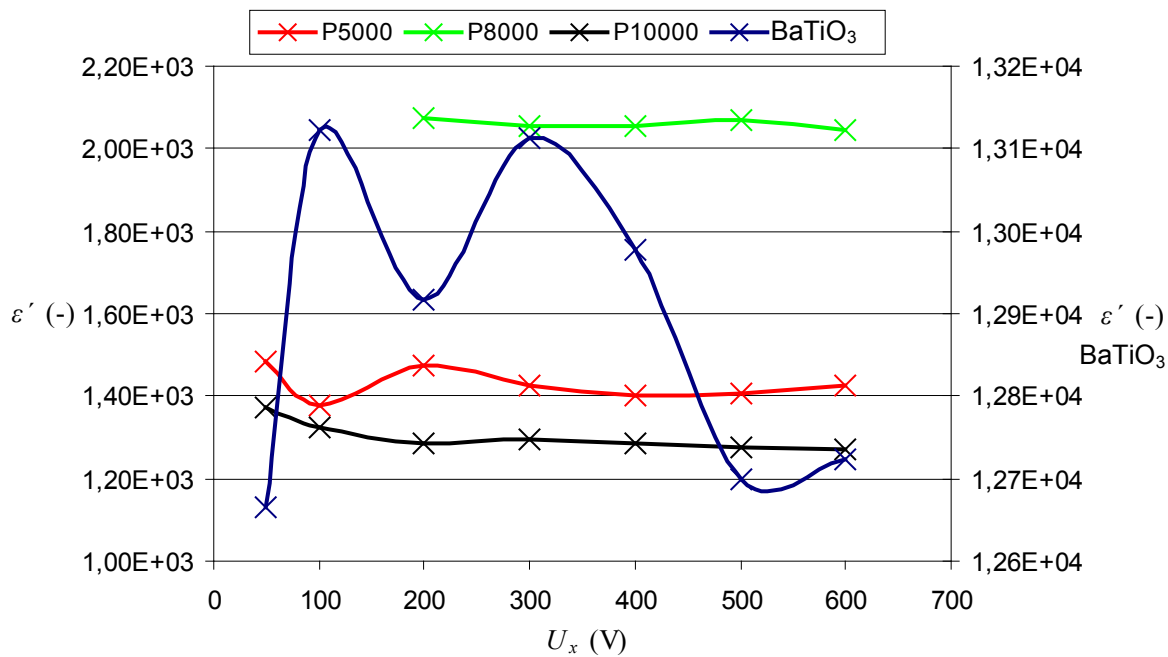
$\vartheta = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0225	0,37700	1913	3668
	100	0,0666	0,26860	2837	5440
	200	0,2236	0,30940	4680	8974
	300	0,4955	0,33550	7131	13674
	400	0,9630	0,34140	10290	19732
	500	1,4562	0,31370	12442	23858
	600	1,9179	0,28390	13557	25996
P5000	20	0,0215	0,02605	4547	5136
	50	0,0552	0,03771	4514	5098
	100	0,1138	0,05560	4839	5465
	200	0,2507	0,08925	5299	5985
	300	0,4143	0,11510	5854	6612
	400	0,5861	0,13970	6222	7027
	500	0,7730	0,15660	6562	7411
	600	0,9875	0,16990	6989	7894
P8000	50	0,0183	0,01897	1558	8345
	100	0,0365	0,02652	1555	8329
	200	0,0759	0,04290	1645	8811
	300	0,1219	0,05349	1731	9272
	400	0,1685	0,05955	1803	9657
	500	0,2144	0,06185	1826	9780
	600	0,2607	0,06291	1847	9893
P10000	20	0,0945	0,02227	20123	17780
	50	0,2535	0,03793	21660	19138
	100	0,5073	0,04295	21530	19024
	200	0,9325	0,03911	19820	17513
	300	1,2700	0,03465	18016	15919
	400	1,5750	0,03265	16688	14745
	500	1,8000	0,03175	15263	13486
	600	2,0000	0,03152	14166	12517



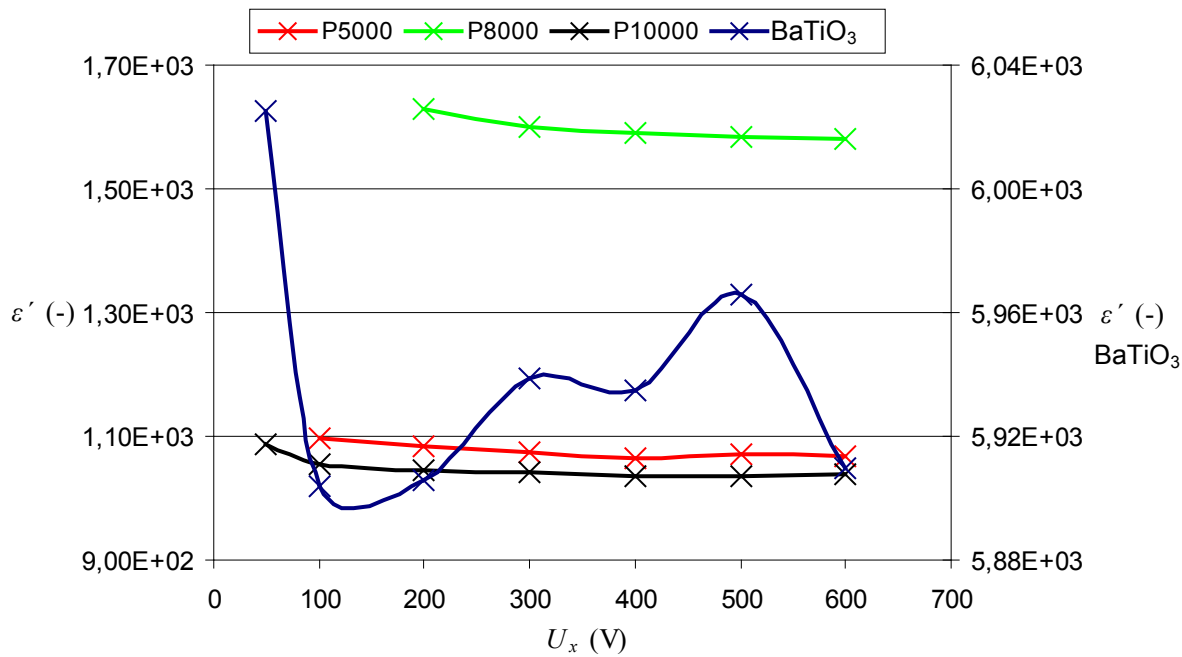
Obr. 12: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 40,1$ °C



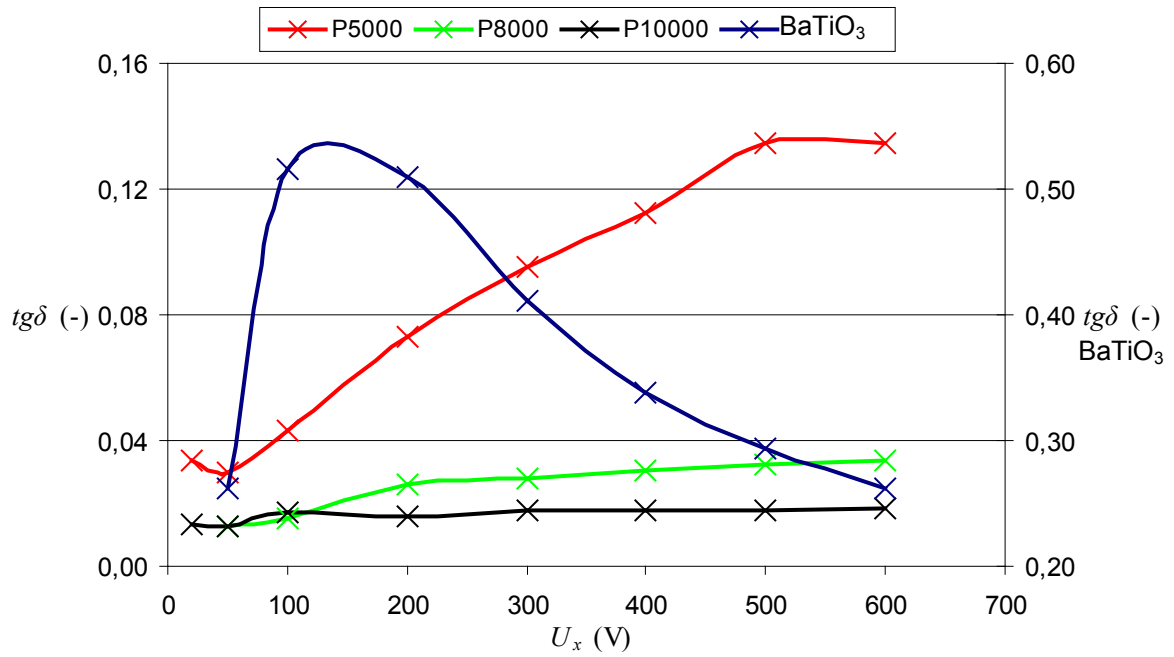
Obr. 13: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 120$ °C



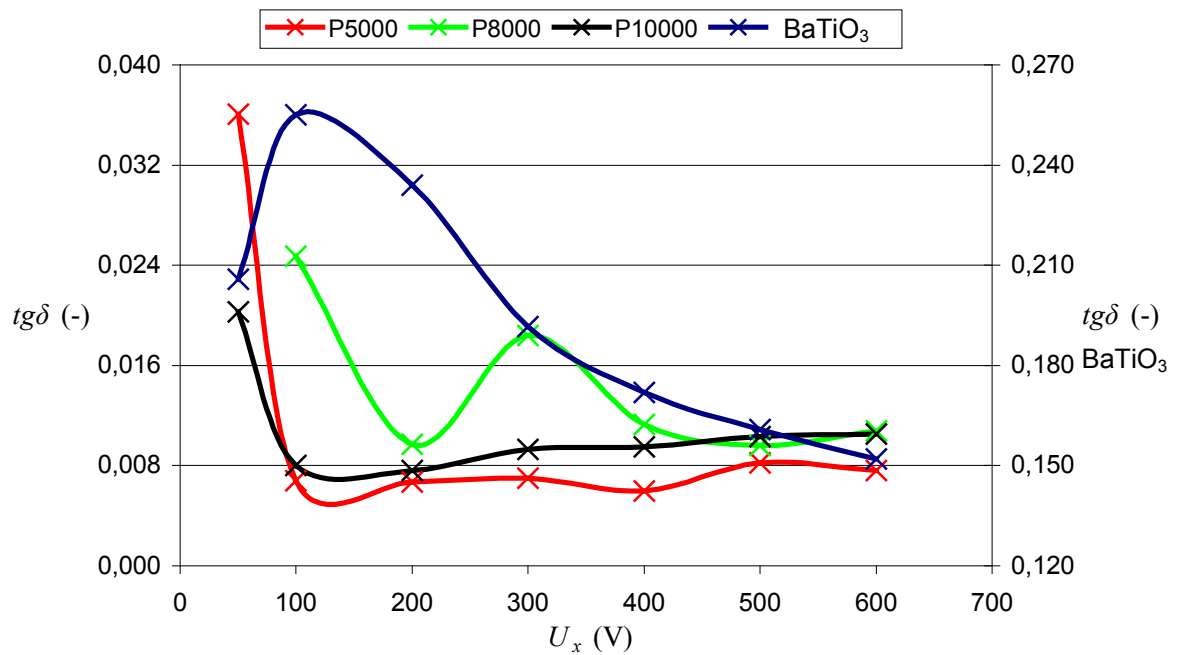
Obr. 14: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 130$ °C



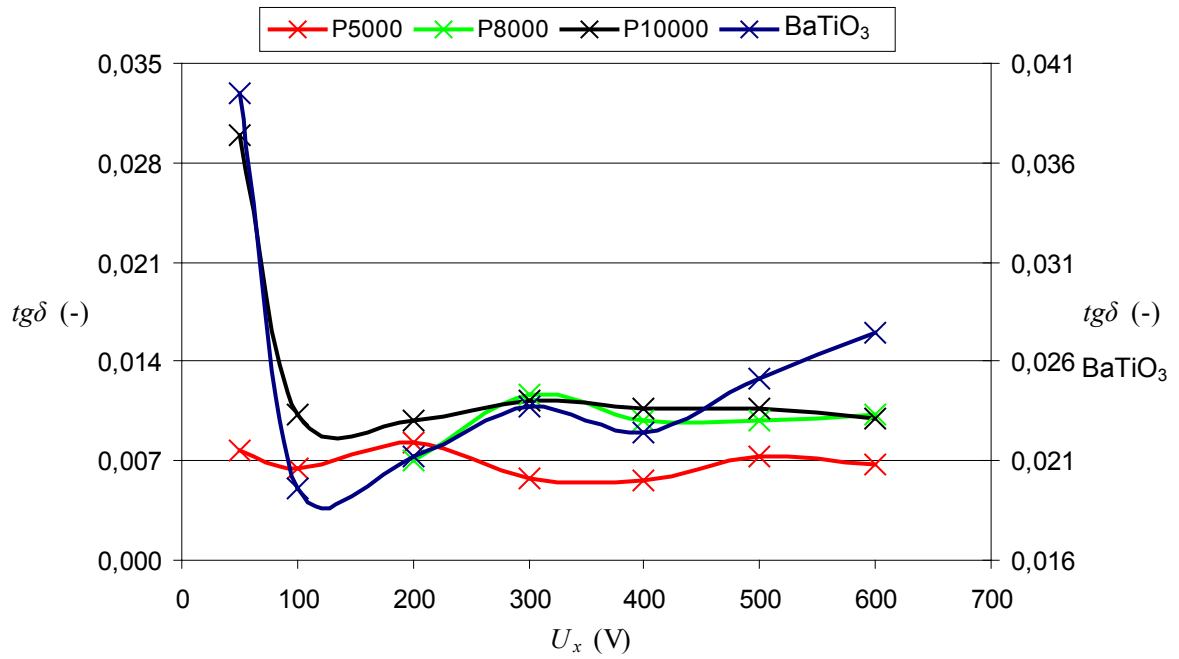
Obr. 15: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 150$ °C



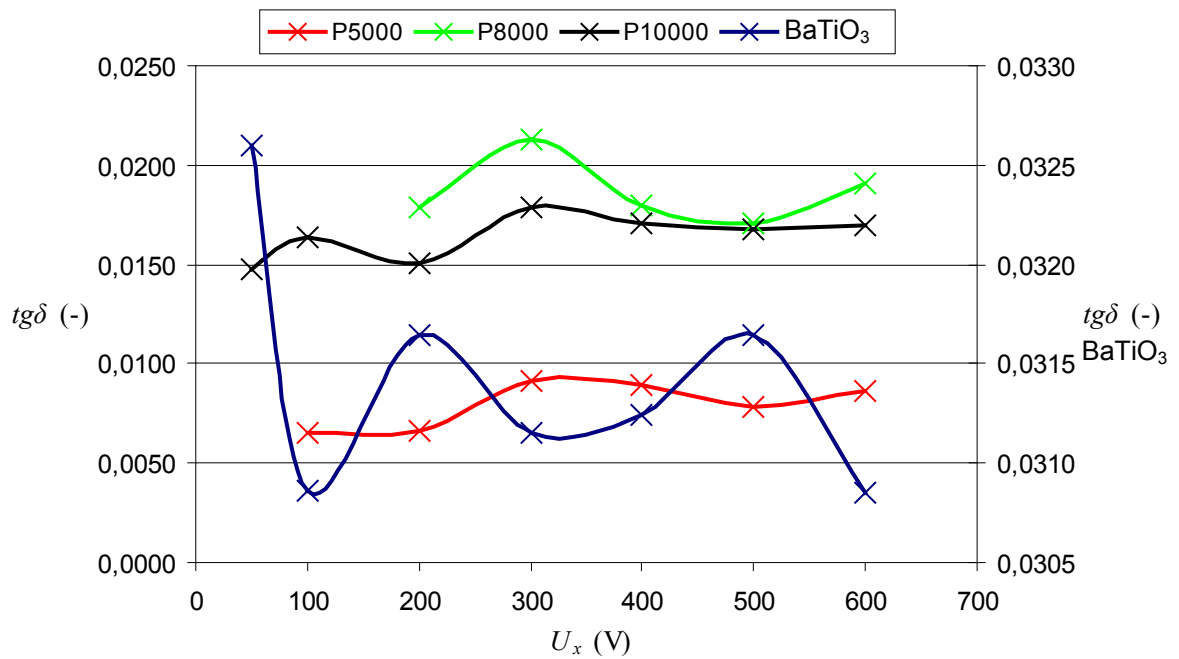
Obr. 16: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 40,1$ °C



Obr. 17: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 120$ °C



Obr. 18: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 130$ °C



Obr. 19: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 150$ °C

3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měřením na vybraných vzorcích feroelektrik byla proměřena teplotní a napěťová závislost složek komplexní permitivity. Hodnoty získané měřením byly zapsány do tabulek přiložených v příloze. Z těchto hodnot byly vyneseny příslušné grafické závislosti (kapitola 2.4). Z grafických závislostí vzorku BaTiO₃ je patrné, že při malých intenzitách střídavého elektrického pole nedochází v soustavě domén k pohybu doménových stěn, takže úroveň polarizace je nízká, této úrovni odpovídá počáteční relativní permitivita. Při zvyšování intenzity elektrického pole dochází postupně k přeskupování doménových hranic a polarizace feroelektrika se prudce zvyšuje a stejný charakter změny vykazuje i relativní permitivita. Při určité hodnotě intenzity elektrického pole se projevuje stav nasycení, kdy se přepolarizují domény v celém objemu látky. Nad oblastí polarizace nasycení již další vzrůst intenzity elektrického pole nevyvolává žádné podstatné zvýšení změny polarizace a relativní permitivita klesá. Z naměřených hodnot je také patrné, že u vzorku BaTiO₃ dosahuje součinitel nelinearity vysokých hodnot $K_{\sim} = 10 \div 28$ při měření do $\nu = 120$ °C, nad teplotou vyšší než $\nu = 120$ °C je součinitel nelinearity velmi malý $K_{\sim} \doteq 1$. Tento součinitel nelinearity je velmi malý díky tomu, že látka přechází nad Curieově bodem $T_c = 120$ °C z feroelektrického do paraelektrického stavu. V průběhu celého měření docházelo se vzrůstající teplotou k postupnému snižování dielektrickým ztrátám látky až na neměřitelné hodnoty daných přístrojů. Tyto neměřitelné hodnoty měli vliv na přesné určování součinitele nelinearity.

4 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly popsány vlastnosti feroelektrických materiálů a jejich praktické využití v elektrotechnickém a elektronickém průmyslu. Feroelektrické materiály mají největší uplatnění v pohyblivých PYR detektorech a v poslední době se uplatňují stále častěji jako vysokokapacitní paměťová média.

V práci je dále popsáno chování feroelektrických materiálů v elektrickém poli o různých intenzitách, toto chování je následně zkoumáno v experimentální části. V experimentální části bylo inovováno laboratorní pracoviště pro zjišťování vlastností feroelektrických materiálů v elektrickém poli s dostupnými prostředky, a následně ověřena jeho funkčnost při měření čtyř vybraných vzorků feroelektrik osciloskopickou metodou. Na vybraných vzorcích byla proměřena teplotní a napěťová závislost složek komplexní permitivity a výsledky zpracovány přehledně do grafických závislostí.

V příloze bakalářské práce je přiložen elektronický text použitelný jako návod pro laboratorní cvičení.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BŘEZINA, Bohuslav. *Feroelektrika*. 1. vyd. n. p., Praha : Academia, 1973. 200 s. ISBN 21-018-73
- [2] DRÁPAL, Stanislav. *Materiály a technologie I*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1983. 163 s.
- [3] ERHART, Jiří. Piezoelektrické "chytré" materiály pro elektrotechniku : PZT keramika. *Vychází 12 krát do roka* [online]. 2002, 2002, 11, [cit. 2010-05-16]. Dostupný z WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22832
- [4] JIRÁK, Josef. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy : část Laboratorní cvičení*.
- [5] JIRÁK, Josef. *Materiály a technická dokumentace : část Materiály v elektrotechnice*. Brno : Interní učební texty FEKT VUT, 2004. 149 s.
- [6] LINES, M.E.; GLASS, A.M. *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials*. Oxford : Oxford University Press, USA , 2001-04-30 . 696 s. ISBN 019850778X
- [7] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.

6 PŘÍLOHA

- 1) Výsledky měření**
- 2) Laboratorní návod**

Tab. P.1: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 40,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta = 40,1 \text{ }^\circ\text{C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0227	0,26190	1944	3728
	100	0,1072	0,51656	4518	8663
	200	0,5711	0,50980	12457	23887
	300	1,0050	0,41070	14228	27283
	400	1,3184	0,33830	14117	27070
	500	1,5798	0,29360	13479	25847
	600	1,8024	0,26150	12740	24430
P5000	20	0,0210	0,03340	4463	5041
	50	0,0554	0,02960	4709	5319
	100	0,1150	0,04330	4874	5505
	200	0,2513	0,07280	5341	6032
	300	0,4063	0,09510	5752	6496
	400	0,5751	0,11260	6148	6944
	500	0,7531	0,13460	6398	7226
	600	0,9432	0,13470	6692	7558
P8000	50	0,0163	0,01240	1374	7359
	100	0,0327	0,01530	1403	7515
	200	0,0668	0,02590	1424	7627
	300	0,1036	0,02780	1459	7815
	400	0,1397	0,03070	1482	7938
	500	0,1754	0,03220	1493	7997
	600	0,2126	0,03350	1499	8029
P10000	20	0,0511	0,01360	10852	9589
	50	0,1271	0,01290	10767	9514
	100	0,2468	0,01690	10696	9451
	200	0,4886	0,01560	10398	9188
	300	0,7084	0,01770	10077	8904
	400	0,9081	0,01780	9662	8537
	500	1,0913	0,01790	9279	8199
	600	1,2705	0,01820	8960	7917

Tab. P.2: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 60,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta = 60,1 \text{ }^\circ\text{C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0251	0,42060	2137	4098
	100	0,1223	0,52080	5355	10268
	200	0,5371	0,45720	12368	23716
	300	0,9472	0,36350	13524	25933
	400	1,2416	0,30540	13384	25664
	500	1,5032	0,26890	12829	24600
	600	1,7297	0,23370	12370	23720
P5000	20	0,0208	0,02460	4449	5025
	50	0,0493	0,02950	4165	4704
	100	0,0497	0,04250	4364	4929
	200	0,1031	0,06250	4654	5256
	300	0,2196	0,07780	4906	5541
	400	0,4835	0,08450	5150	5817
	500	0,6184	0,08930	5262	5943
	600	0,7581	0,09090	5369	6064
P8000	50	0,0133	0,03610	1136	6085
	100	0,0263	0,02440	1105	5919
	200	0,0521	0,01380	1105	5919
	300	0,0178	0,01520	1105	5919
	400	0,1032	0,01740	1105	5919
	500	0,1312	0,01750	1114	5967
	600	0,1574	0,01990	1116	5978
P10000	20	0,0265	0,04720	5525	4882
	50	0,0612	0,00750	5185	4581
	100	0,1243	0,00810	5270	4656
	200	0,2441	0,00830	5178	4575
	300	0,3648	0,01060	5176	4573
	400	0,4836	0,00940	5136	4538
	500	0,5950	0,01020	5060	4471
	600	0,7034	0,01090	4961	4383

Tab. P.3: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 80,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$\vartheta = 80,1 \text{ }^\circ\text{C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0323	0,42320	2737	5248
	100	0,1356	0,47060	5851	11220
	200	0,5810	0,40040	12544	24054
	300	0,9657	0,32290	13765	26395
	400	1,2431	0,26850	13331	25563
	500	1,4812	0,23280	12747	24443
	600	1,7193	0,21340	12294	23574
P5000	20	0,0159	0,22950	3400	3840
	50	0,0391	0,02620	3315	3744
	100	0,1782	0,03830	3315	3744
	200	0,1563	0,03660	3329	3760
	300	0,2387	0,03690	3372	3808
	400	0,3236	0,04200	3432	3876
	500	0,4068	0,04070	3440	3885
	600	0,4901	0,04000	3466	3915
P8000	50	0,0102	0,02030	850	4553
	100	0,0193	0,02400	808	4328
	200	0,0378	0,01150	786	4210
	300	0,0563	0,01670	793	4247
	400	0,0758	0,01180	804	4306
	500	0,0939	0,01110	791	4237
	600	0,1124	0,01340	793	4247
P10000	20	0,0152	0,01630	3230	2854
	50	0,0396	0,00770	3315	2929
	100	0,0745	0,00600	3173	2804
	200	0,1487	0,00660	3152	2785
	300	0,2964	0,00740	3145	2779
	400	0,2963	0,00850	3238	2861
	500	0,3639	0,00880	3103	2742
	600	0,4397	0,00880	3121	2758

Tab. P.4: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 100\text{ °C}$

$\vartheta = 100\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0301	0,29950	2550	4890
	100	0,1172	0,35730	5086	9753
	200	0,5459	0,32970	11971	22955
	300	0,9374	0,26540	13619	26115
	400	1,2653	0,22690	18204	34907
	500	1,5432	0,20310	16692	32008
	600	1,8542	0,18730	16104	30880
P5000	20	0,0121	0,03125	2564	2896
	50	0,0254	0,02690	2125	2400
	100	0,0513	0,01610	2164	2444
	200	0,1019	0,01580	2146	2424
	300	0,1527	0,01550	2153	2432
	400	0,2001	0,01670	2125	2400
	500	0,2536	0,01580	2151	2429
	600	0,3030	0,02130	2146	2424
P8000	50				
	100	0,0138	0,00940	588	3149
	200	0,0271	0,02880	578	3096
	300	0,0402	0,00910	569	3048
	400	0,0540	0,01110	574	3074
	500	0,0674	0,00970	573	3069
	600	0,0810	0,01010	575	3080
P10000	20	0,0117	0,01223	2486	2197
	50	0,0261	0,01450	2210	1953
	100	0,0518	0,01510	2194	1939
	200	0,1032	0,00590	2189	1934
	300	0,1534	0,00730	2168	1916
	400	0,2039	0,00860	2157	1906
	500	0,2539	0,00930	2142	1893
	600	0,3064	0,00860	2168	1916

Tab. P.5: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 110\text{ °C}$

$\vartheta = 110\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0330	0,25980	2836	5438
	100	0,1301	0,30590	5610	10757
	200	0,6238	0,27480	13749	26364
	300	1,0880	0,23400	15744	30190
	400	1,4315	0,20150	15445	29616
	500	1,7260	0,18260	14906	28583
	600	2,0643	0,17480	15289	29317
P5000	20				
	50	0,0217	0,02290	1845	2084
	100	0,0416	0,01040	1764	1992
	200	0,0825	0,00990	1749	1975
	300	0,1248	0,01040	1757	1984
	400	0,1658	0,01030	1760	1988
	500	0,2063	0,00920	1754	1981
	600	0,2461	0,01160	1737	1962
P8000	50				
	100	0,0121	0,01640	511	2737
	200	0,0232	0,03290	493	2641
	300	0,0347	0,00830	493	2641
	400	0,0464	0,00770	493	2641
	500	0,0578	0,01360	492	2635
	600	0,0692	0,00880	490	2625
P10000	20	0,0103	0,00784	2182	1928
	50	0,0227	0,00732	1924	1700
	100	0,0438	0,00391	1860	1643
	200	0,0875	0,00890	1862	1645
	300	0,1301	0,00990	1860	1643
	400	0,1753	0,01000	1852	1636
	500	0,2163	0,01020	1839	1625
	600	0,2568	0,01030	1827	1614

Tab. P.6: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 120\text{ °C}$

$\vartheta = 120\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0385	0,20590	3340	6405
	100	0,1801	0,25510	7862	15076
	200	0,8100	0,23400	17815	34161
	300	1,3233	0,19160	19267	36945
	400	1,7154	0,17190	13113	25145
	500	2,1000	0,16080	18212	34922
	600	2,5142	0,15190	18249	34993
P5000	20				
	50	0,0185	0,03605	1573	1777
	100	0,0357	0,00680	1517	1713
	200	0,0689	0,00670	1465	1655
	300	0,1026	0,00700	1454	1642
	400	0,1380	0,00600	1466	1656
	500	0,1723	0,00820	1460	1649
	600	0,2074	0,00760	1461	1650
P8000	50				
	100	0,0106	0,02470	451	2416
	200	0,0203	0,00970	432	2314
	300	0,0303	0,01840	429	2298
	400	0,0407	0,01130	432	2314
	500	0,0503	0,00960	428	2292
	600	0,0607	0,01080	430	2303
P10000	20				
	50	0,0196	0,02030	1663	1469
	100	0,0388	0,00802	1652	1460
	200	0,0770	0,00760	1636	1446
	300	0,1154	0,00930	1629	1439
	400	0,1553	0,00950	1647	1455
	500	0,1937	0,01030	1641	1450
	600	0,2286	0,01050	1618	1430

Tab. P.7: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 130\text{ °C}$

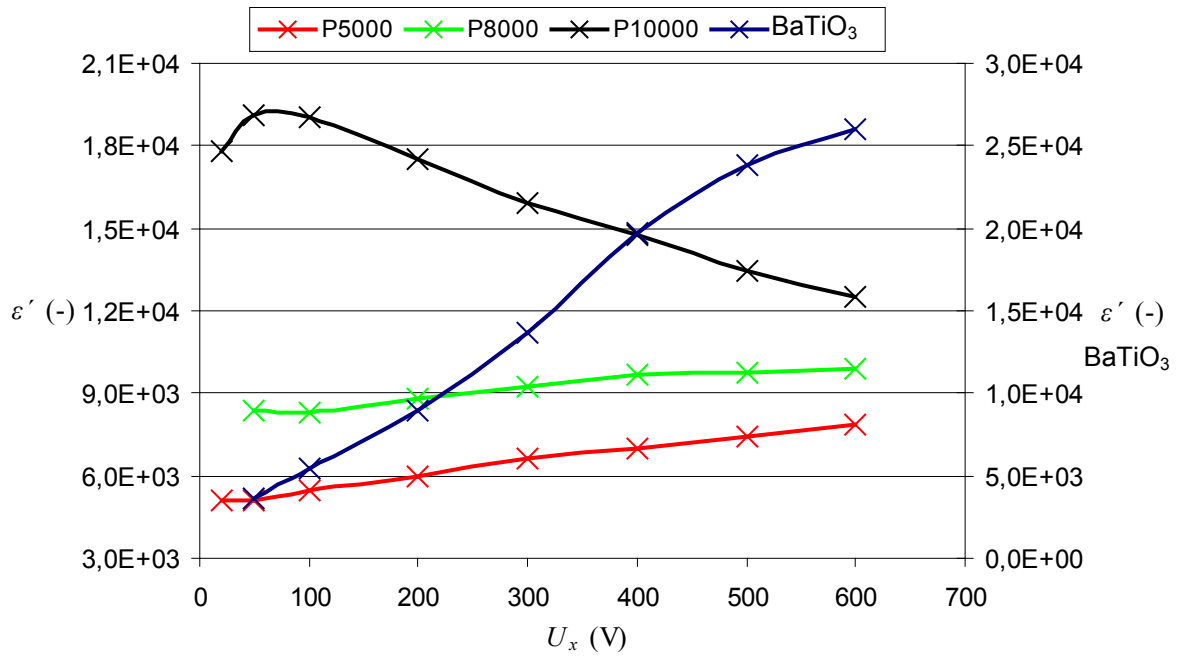
$\vartheta = 130\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0779	0,03950	6605	12665
	100	0,1612	0,01960	6843	13122
	200	0,3165	0,02120	6736	12917
	300	0,4835	0,02370	6838	13112
	400	0,6397	0,02240	6768	12978
	500	0,7793	0,02510	6622	12698
	600	0,9330	0,02740	6635	12723
P5000	20				
	50	0,0157	0,00780	1312	1482
	100	0,0293	0,00650	1219	1377
	200	0,0615	0,00830	1304	1473
	300	0,0896	0,00580	1263	1426
	400	0,1178	0,00560	1243	1404
	500	0,1463	0,00730	1244	1405
	600	0,1784	0,00680	1261	1424
P8000	50				
	100				
	200	0,0182	0,00700	387	2073
	300	0,0271	0,01160	384	2057
	400	0,0360	0,00980	384	2057
	500	0,0453	0,00990	386	2067
	600	0,0539	0,01020	382	2046
P10000	20				
	50	0,0183	0,02990	1553	1372
	100	0,0351	0,01030	1496	1322
	200	0,0686	0,00980	1456	1287
	300	0,1037	0,01130	1466	1295
	400	0,1374	0,01070	1456	1287
	500	0,1702	0,01070	1445	1277
	600	0,2033	0,01000	1438	1271

Tab. P.8: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 140\text{ °C}$

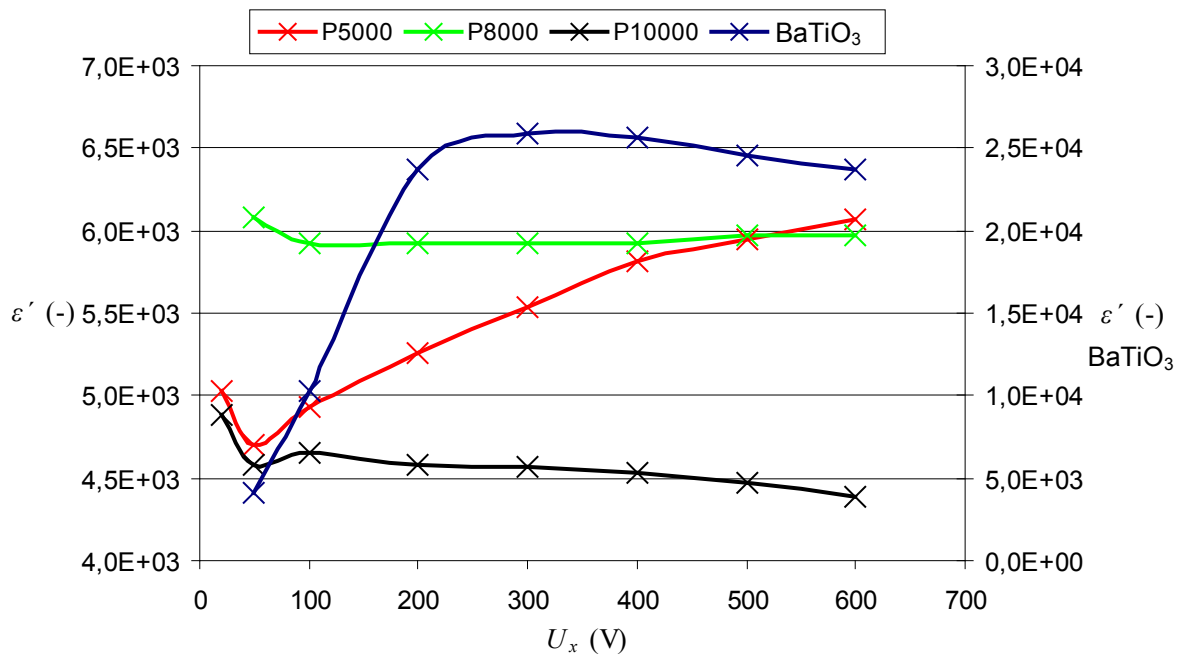
$\vartheta = 140\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0505	0,02523	4298	8242
	100	0,1018	0,02463	4324	8291
	200	0,2033	0,02539	4326	8295
	300	0,3070	0,02515	4344	8330
	400	0,4080	0,02482	4331	8305
	500	0,5055	0,02522	4298	8242
	600	0,6032	0,02450	4275	8198
P5000	20				
	50	0,0133	0,00831	1130	1276
	100	0,0255	0,00665	1083	1223
	200	0,0510	0,00775	1085	1225
	300	0,0765	0,00605	1081	1221
	400	0,1013	0,00714	1076	1215
	500	0,1266	0,00828	1074	1213
	600	0,1512	0,00872	1071	1210
P8000	50				
	100				
	200	0,0163	0,01250	343	1837
	300	0,0241	0,01429	342	1832
	400	0,0318	0,01466	337	1805
	500	0,0394	0,01623	334	1789
	600	0,0471	0,01457	334	1789
P10000	20				
	50	0,0158	0,01685	1345	1188
	100	0,0311	0,01392	1321	1167
	200	0,0612	0,01618	1303	1151
	300	0,0917	0,01634	1305	1153
	400	0,1219	0,01450	1297	1146
	500	0,1526	0,01471	1295	1144
	600	0,1818	0,01524	1292	1142

Tab. P.9: Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků při $\vartheta = 150\text{ °C}$

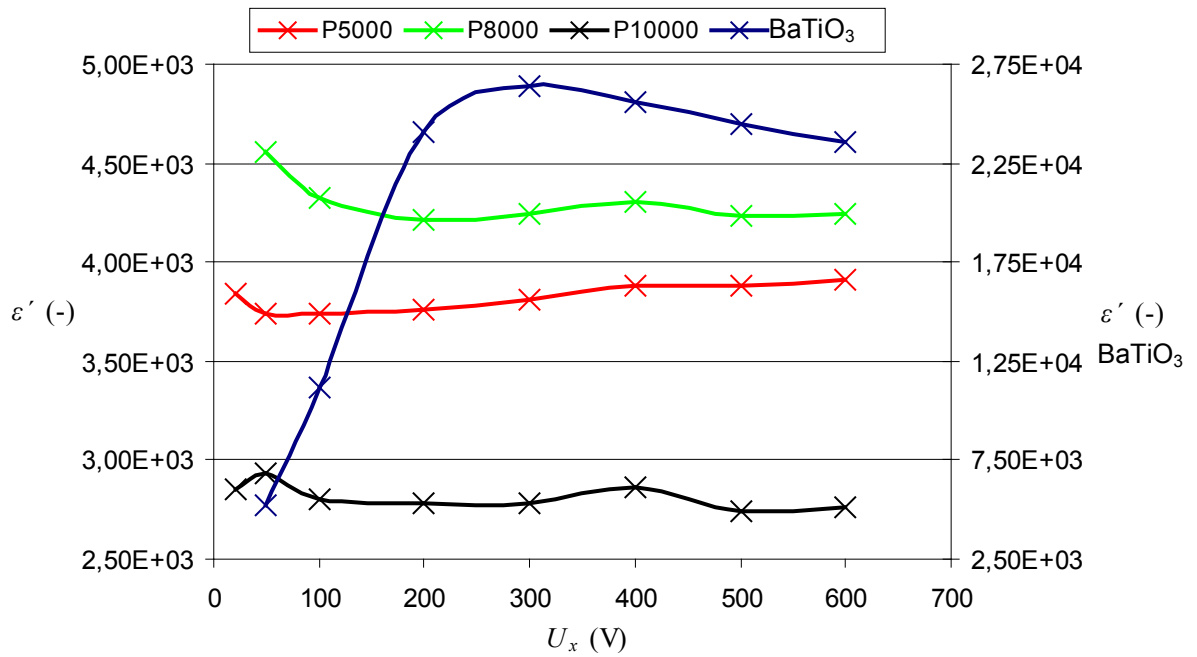
$\vartheta = 150\text{ °C}$					
označení vzorku	U_x (V)	U_n (V)	$tg\delta$ (-)	C_x (pF)	ε' (-)
BaTiO₃	50	0,0370	0,03260	3142	6025
	100	0,0725	0,03086	3079	5904
	200	0,1419	0,03164	3080	5906
	300	0,2186	0,03115	3097	5939
	400	0,2905	0,03124	3095	5935
	500	0,3654	0,03164	3111	5965
	600	0,4361	0,03085	3082	5910
P5000	20				
	50				
	100	0,0228	0,00655	971	1097
	200	0,0452	0,00666	960	1084
	300	0,0674	0,00911	951	1074
	400	0,0888	0,00897	942	1064
	500	0,1123	0,00788	947	1070
	600	0,1336	0,00867	944	1066
P8000	50				
	100				
	200	0,0144	0,01785	304	1628
	300	0,0211	0,02128	299	1601
	400	0,0279	0,01793	297	1591
	500	0,0348	0,01710	296	1585
	600	0,0417	0,01903	295	1580
P10000	20				
	50	0,0145	0,01479	1229	1086
	100	0,0281	0,01637	1194	1055
	200	0,0555	0,01508	1182	1044
	300	0,0834	0,01791	1179	1042
	400	0,1106	0,01709	1172	1036
	500	0,1378	0,01681	1172	1036
	600	0,1664	0,01692	1177	1040



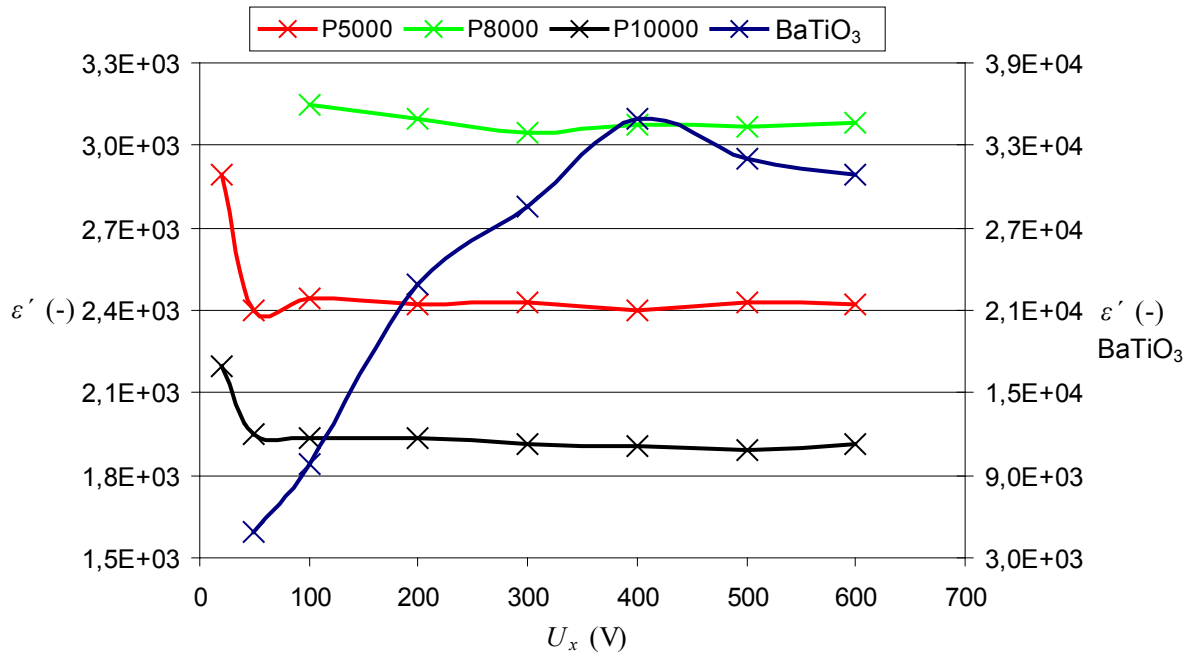
Obr. P.1: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 23,8$ °C



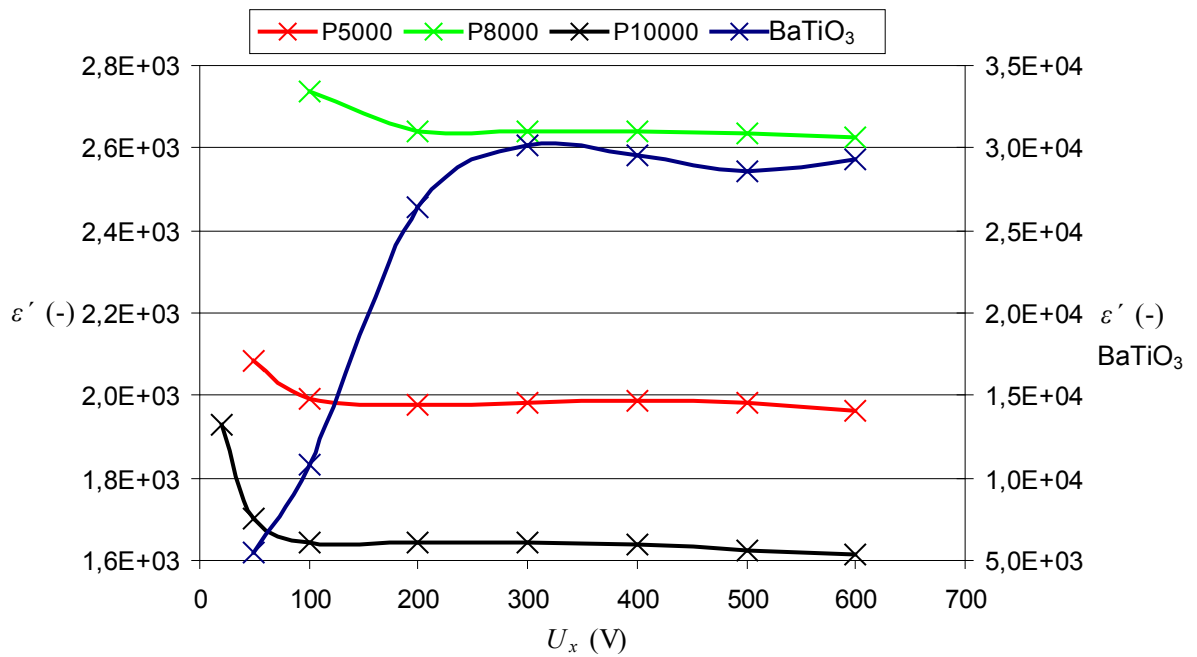
Obr. P.2: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 60,1$ °C



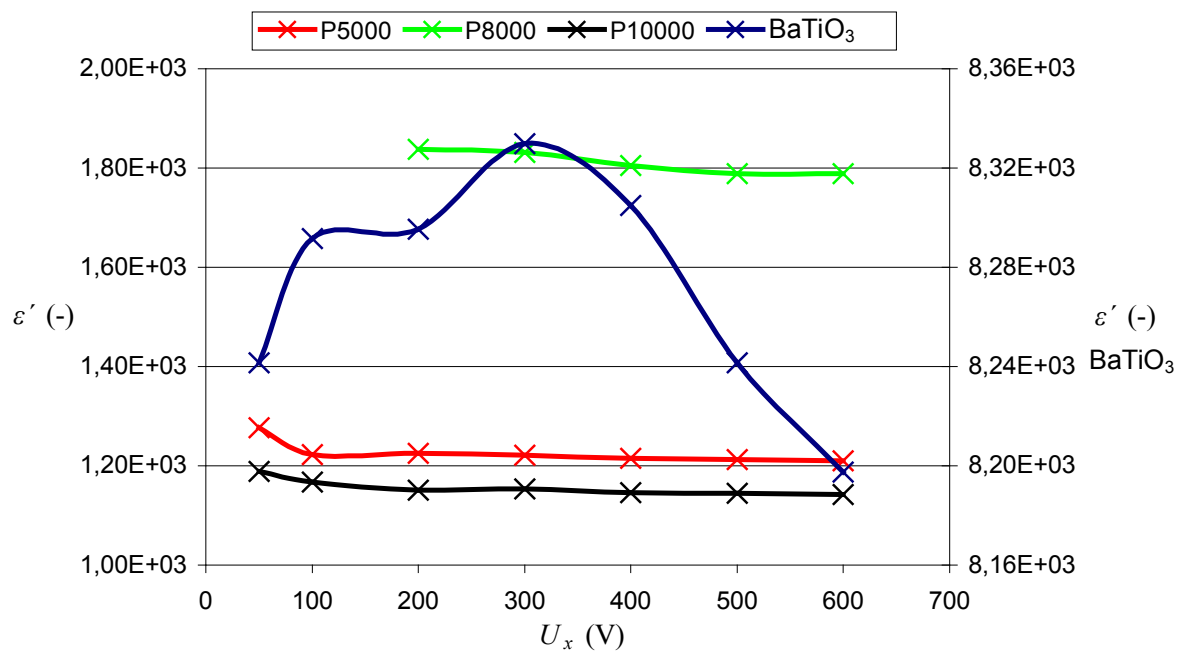
Obr. P.3: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 80,1$ °C



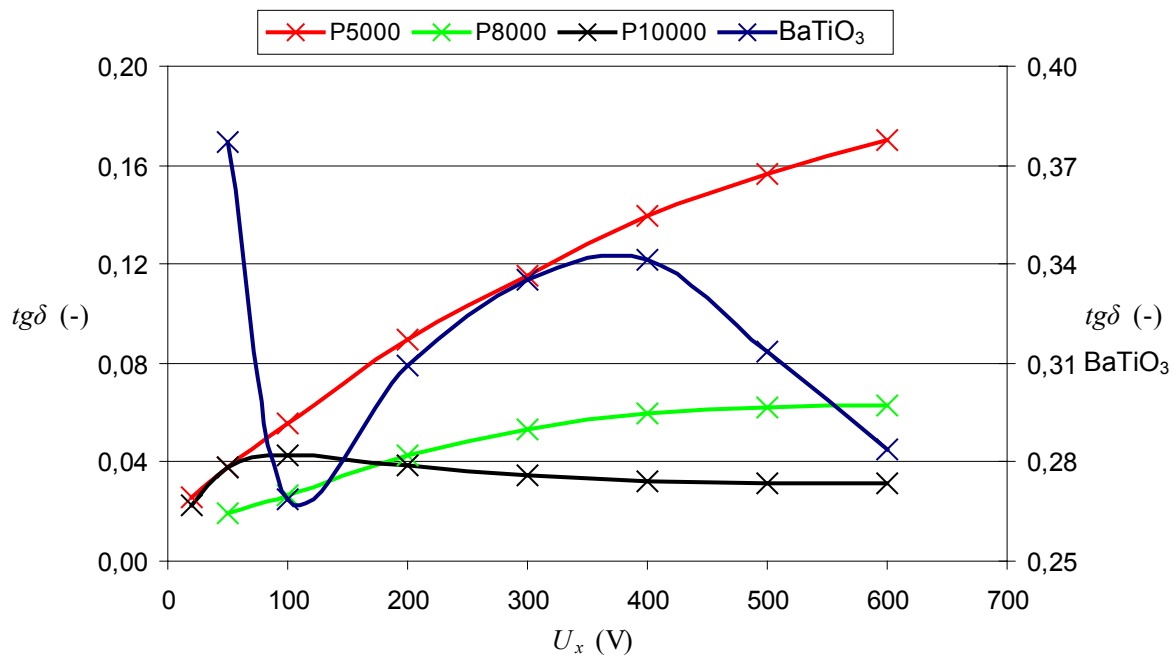
Obr. P.4: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 100$ °C



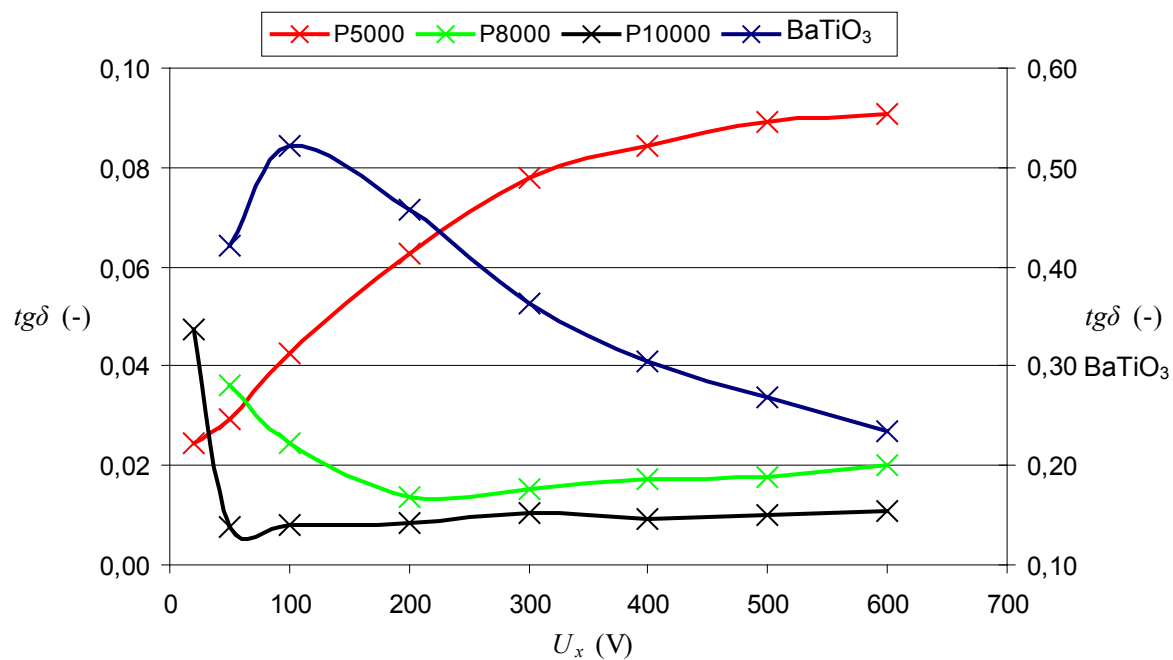
Obr. P.5: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 110$ °C



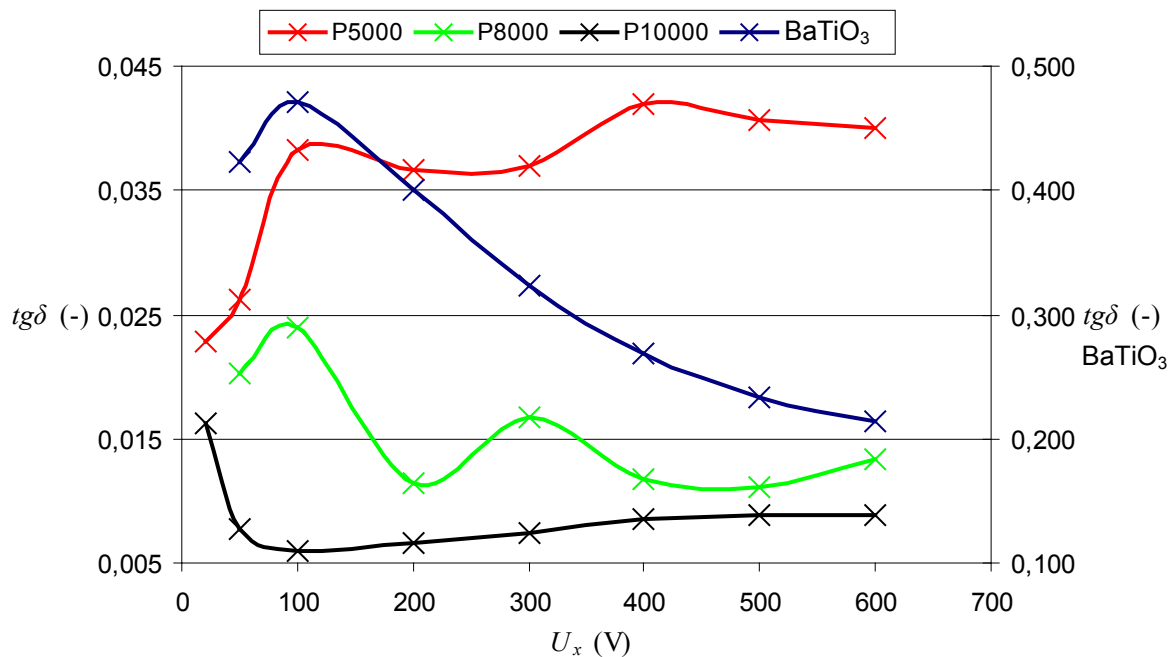
Obr. P.6: Závislost reálné části komplexní permitivity na napětí při $\vartheta = 140$ °C



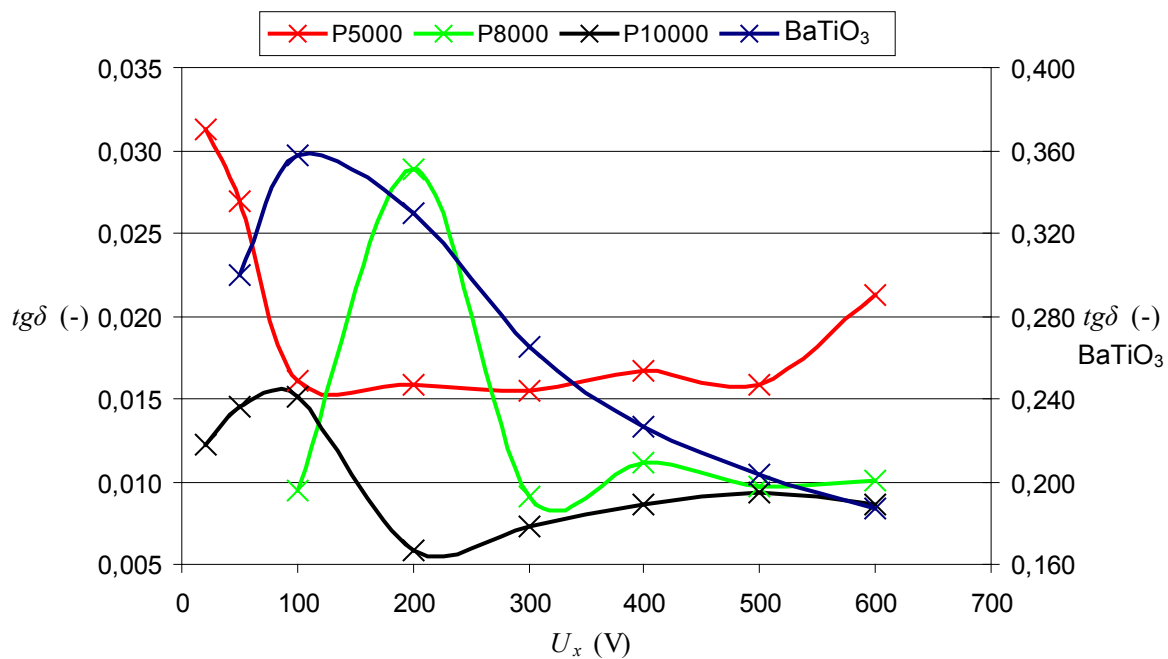
Obr. P.7: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 23,8$ °C



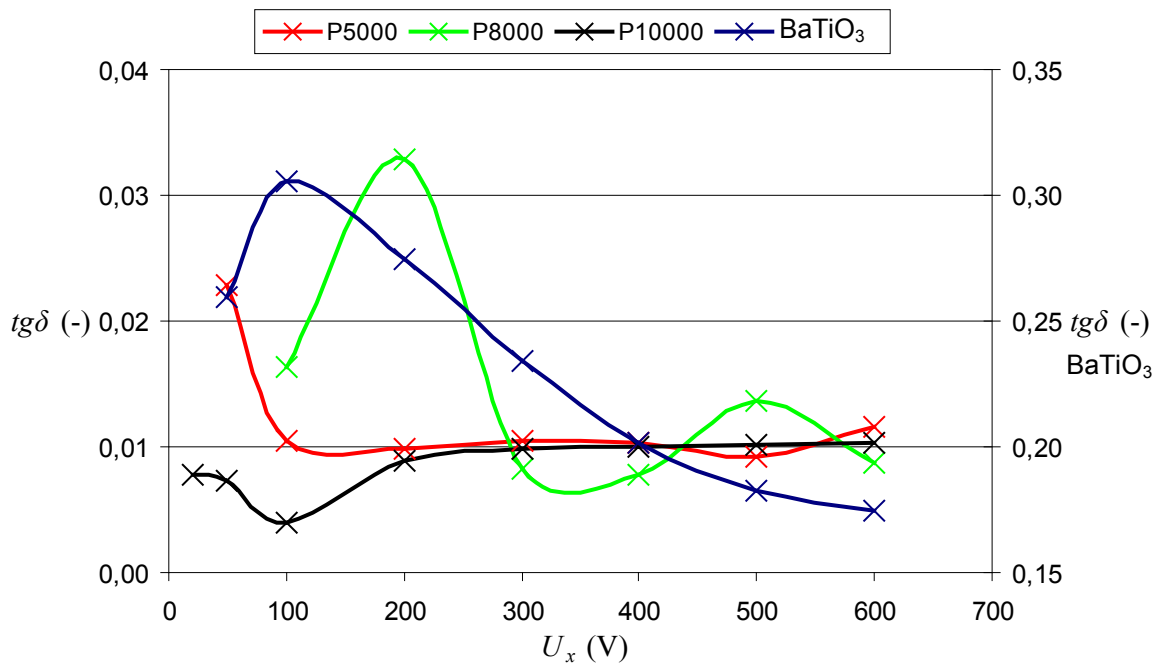
Obr. P.8: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 60,1$ °C



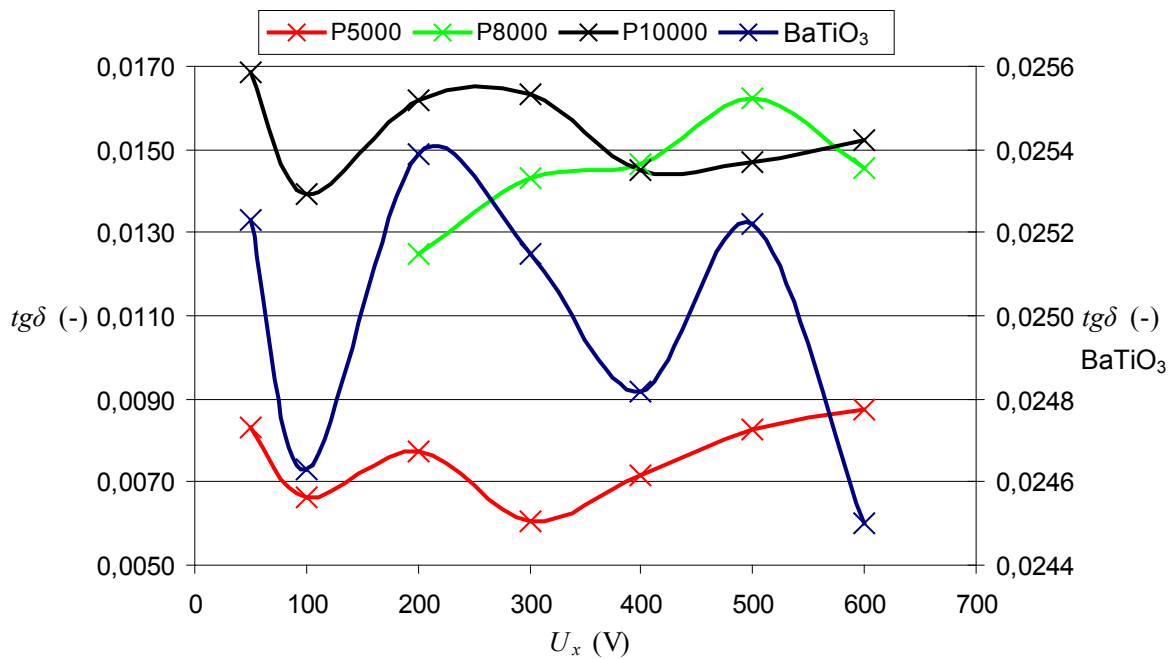
Obr. P.9: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 80,1^\circ\text{C}$



Obr. P.10: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 100^\circ\text{C}$



Obr. P.11: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 110\text{ }^\circ\text{C}$



Obr. P.12: Závislost ztrátového činitele na napětí při $\vartheta = 140\text{ }^\circ\text{C}$

Měření dielektrických vlastností feroelektrik v elektrickém poli

Cíl úlohy:

Cílem úlohy je seznámit se s charakteristickým průběhem závislosti relativní permitivity a ztrátového činitele feroelektrického materiálu na intenzitě elektrického pole a vlivem teploty na průběhy $\varepsilon' = f(E)$ a $\operatorname{tg}\delta = f(E)$.

Zadání úlohy:

U předložených vzorků zjistěte při několika teplotách průběhy napěťových závislostí ε' a $\operatorname{tg}\delta$ v rozsahu napětí 20 – 600 V při kmitočtu 50 Hz. Měřte v teplotním rozsahu 25 – 150 °C.

Údaje ε' a $\operatorname{tg}\delta$ stanovte vyhodnocením hysterezní smyčky zobrazené na obrazovce osciloskopu. Zjištěné hodnoty vyneste do grafických závislostí $\varepsilon' = f(E)$ a $\operatorname{tg}\delta = f(E)$ při $\nu = \text{konst}$.

Tab. P.10: Vlastnosti měřených vzorků

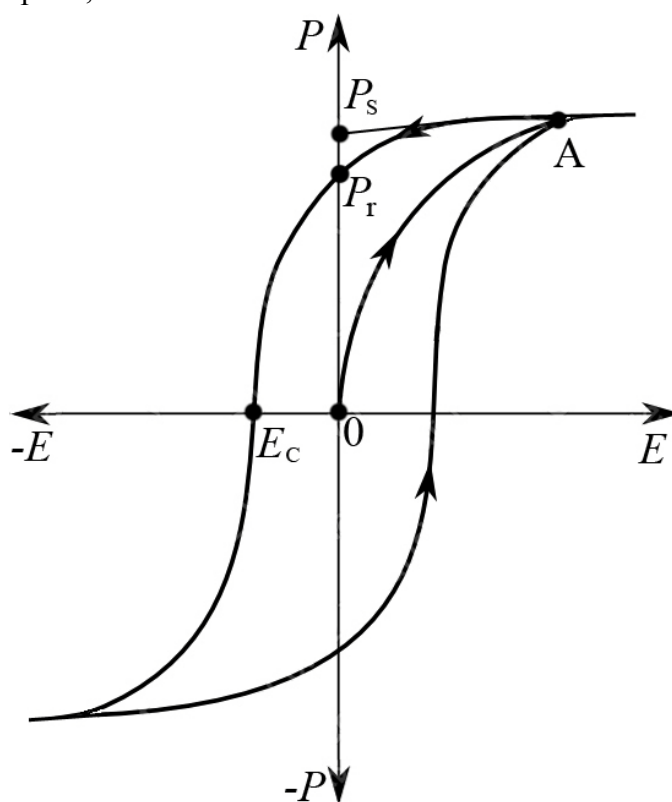
číslo vzorku	označení vzorku	d (m)	h (m)
1	BaTiO ₃	0,01500	0,00300
2	P1000	0,01000	0,00401
3	N47	0,02010	0,00111
4	P5000	0,02508	0,00494
5	P8000	0,01300	0,00395
6	P10000	0,01552	0,00148

Teoretický úvod:

Dielektrické látky, jež jsou v jistém teplotním oboru spontánně polarizovány, aniž je k nim přiloženo vnější elektrické pole, nazýváme pyroelektrika. U některých pyroelektrik lze směr vektoru spontánní polarizace \vec{P}_s změnit např. vnějším elektrickým polem. Jsou to právě feroelektrické materiály (feroelektrika), které se touto vlastností vyčleňují ze širší skupiny pyroelektrik, charakterizovaných pouze spontánní polarizací.

Největší zvláštností feroelektrik je vysoká hodnota relativní permitivity ε' a nelineární závislost jejich polarizace \vec{P} na intenzitě vnějšího elektrického pole \vec{E} a existence hysterezní smyčky při přepolarizování. Charakteristický průběh prvotního polarizování a hysterezní smyčka jsou znázorněny na obr. P.13. Při prvotním polarizování se polarizace feroelektrik

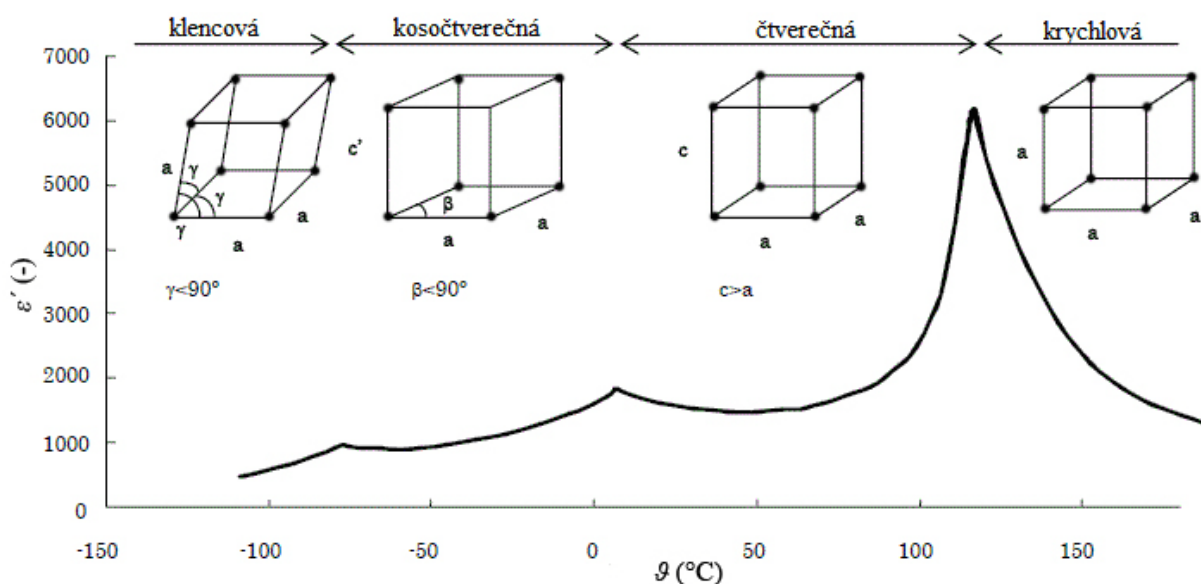
mění podle křivky 0A. V bodu A je vzorek plně polarizován. Proto v silnějších polích roste polarizace lineárně, jako u paraelektrických látek. Dochází-li ke snižování intenzity elektrického pole \vec{E} , nesleduje vektor polarizace křivku prvotní polarizace, ale je větší. Proto při $\vec{E} = 0$ zůstává látka částečně polarizována. Hodnota \vec{P}_r udává remanentní polarizaci. Zbytkovou polarizaci odstraníme, umístíme-li na vzorek pole opačného smyslu o intenzitě \vec{E}_c , označované jako koercitivní pole, nebo také jako koercitivní intenzita. Feroelektrické materiály jsou charakterizující svými \vec{P}_s , \vec{P}_r a \vec{E}_c veličinami. Jejich hodnoty jsou však závislé nejen na typu materiálu, technologii výroby, ale i na jeho čistotě a podmínkách polarizování, například teplotě, tvaru a rozměru vzorku.



Obr. P.13: Hysterezní smyčka: závislost polarizace feroelektrického vzorku na elektrickém poli

Feroelektrické látky jsou charakterizovány určitou teplotou T_c , kterou nazýváme Curieovou teplotou, Curieovým bodem nebo teplotou feroelektrického fázového přechodu. Tato teplota odděluje feroelektrický stav od stavu paraelektrického, v níž látka není spontánně polarizována. Oba stavy se od sebe liší krystalografickou symetrií. Paraelektrický stav existuje obvykle při vyšších teplotách než fáze feroelektrická. Feroelektrika při teplotách blízkých T_c jsou silně dielektricky nelineární a mají vysokou hodnotu relativní permitivity.

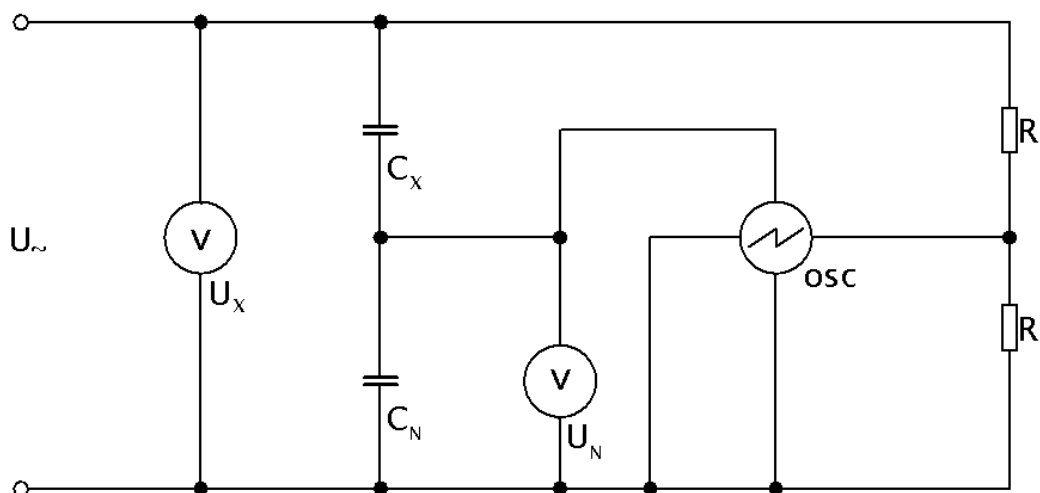
Titaničitan barnatý patří k nejvíce prozkoumaným feroelektrikům, jelikož má jednoduchou strukturu, umožňuje sledování fázových přechodů, feroelektrických a jiných vlastností při snadno dosažitelných teplotách. Lze jej připravit jako monokrystal i keramický materiál a využít v řadě aplikací v praxi. Pro fyzikální výzkum jsou vhodnější ve většině případů monokrystal BaTiO₃. Titaničitan barnatý se vyskytuje ve čtyřech krystalografických modifikacích. Při teplotách do -100 °C má mřížku klencovou (trigonální). V rozmezí teplot od -100 °C do 0 °C je stabilní mřížka kosočtverečná. V teplotním rozmezí teplot 0 °C do 120 °C má mřížku čtverečnou a za vyšších teplot mřížku krychlovou. Postupná změna krystalografických modifikací je znázorněna na obr. P.14. Přeměna z krychlové na čtverečnou mřížku při ochlazování, souvisí s přechodem z paraelektrického do feroelektrického stavu. Protože rychlost difuze za teplot okolo 120 °C je zanedbatelná, musí se uvažovaná přeměna uskutečnit bez difuze, například vzájemným posuvem iontů vůči sobě.



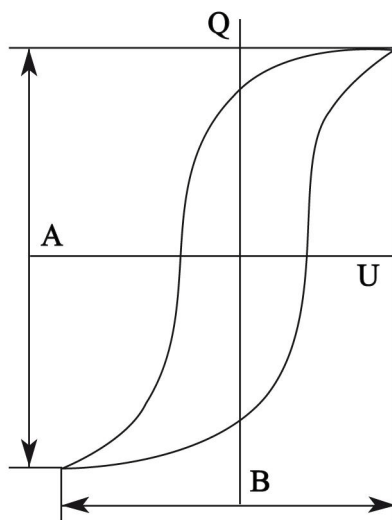
Obr. P.14: Postupná změna krystalografických modifikací BaTiO₃ na teplotě

Měřicí metoda

Osciloskopickou metodou lze určit ztrátový činitel $\operatorname{tg}\delta$ a kapacitu kondenzátoru se zkoumaným vzorkem v širokém rozsahu hodnot intenzit elektrického pole i kmitočtů. Základní zapojení obvodu pro zobrazení hysterezní smyčky je na obr. P.15.



Obr. P.15: Základní zapojení měřicí metody



Obr. P.16: Hysterezní smyčka

Do série se vzorkem o kapacitě C_x je připojen kondenzátor o kapacitě C_n . Při splnění podmínky $C_n \gg C_x$ bude napětí na kondenzátoru C_n úměrné náboji na kondenzátoru C_x a vstupní napětí bude přibližně rovno napětí na vzorku C_x . Napětí z kondenzátoru C_n odpovídající náboji na vzorku je přivedeno na vertikální zesilovač osciloskopu. Na horizontální zesilovač je přivedeno vstupní napětí, tedy napětí na vzorku upravené odporovým děličem. Na obrazovce osciloskopu se zobrazí hysterezní smyčka obr. P.16., která

odpovídá vlastnostem použitého feroelektrického materiálu. Podmínky měření vlastností vzorku lze měnit změnou vstupního napětí U . [4]

K určení velikosti kapacity vzorku C_x je nutno stanovit měřítka na osách napětí a náboje.

Platí: $U \sim U_x$, $U_n \sim Q_x$

Pro měřítka na ose napětí

$$m_U = \frac{2\sqrt{2}U_x}{B} \quad (1)$$

a pro měřítka na ose náboje

$$m_Q = \frac{2\sqrt{2}U_n C_N}{A} \quad (2)$$

kde A, B jsou délky vymežující podle obr. P.16 rozměry hysterezní smyčky.

Kapacita C_x je

$$C_x = \frac{Q_x}{U_x} = \frac{m_Q A}{m_U B}, \quad (3)$$

po dosazení z (1) a (2)

$$C_x = \frac{U_n C_N}{U_x}. \quad (4)$$

Relativní permitivitu ε' stanovíme ze vztahu

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (5)$$

kde C_x je kapacita měřeného kondenzátoru s vloženým dielektrikem a C_0 kapacita geometricky shodného vakuového kondenzátoru. Geometrická kapacita C_0 se z pravidla neměří, ale počítá z rozměru kondenzátoru podle vztahu

$$C_0 = \varepsilon \frac{S_{ef}}{h}, \quad (6)$$

kde ε_0 je absolutní permitivita vakua, S_{ef} je efektivní plocha měřící elektrody a h je vzdálenost elektrod, resp. tloušťka měřeného materiálu. Plochu elektrody spočítáme ze vztahu

$$S_{ef} = \pi \frac{(d+c)^2}{4}, \quad (7)$$

kde d je průměr měřící elektrody a c je vzdálenost mezery mezi měřící a ochrannou elektrodou.

Z principu daného měření vyplývá, že vyčíslená veličina představuje amplitudovou relativní permitivitu. Hodnota ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ se stanoví z poměru činného a jalového výkonu v dielektriku podle vzorce

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_{\varepsilon}}{P_j}. \quad (8)$$

Činný výkon P_{ε} je úměrný ploše hysterezní smyčky, jalový výkon P_j je úměrný maximálním hodnotám napětí a náboje ve vzorku.

Činný výkon

$$P_{\varepsilon} = f \int u \cdot dq = f \cdot m_U \cdot m_Q \cdot S \quad (9)$$

kde f (Hz) je kmitočet pracovního střídavého napětí a S (m²) je plocha vymezená hysterezní smyčkou.

Jalový výkon vypočítáme podle vztahu

$$P_j = \omega \frac{Q_m U_m}{2} = \pi f \frac{m_Q m_U AB}{4} \quad (10)$$

Po dosazení (9) a (10) do (8)

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{4S}{\pi AB} \quad (11)$$

Postup měření

- 1) Stanovíme geometrické rozměry předložených vzorků a vypočteme geometrické kapacity C_0 .
- 2) Vzorky umístíme do termostatu. Termostat zapneme a pomocí regulačních tlačítek nastavíme příslušnou teplotu.
- 3) Po dokonalém prohřátí vzorku (po uplynutí 10 – 15 minut po dosažení požadované teploty) nastavíme předepsaná napětí na vzorku, odečteme napětí U_n a pomocí (4), (5) a (6) stanovíme hodnoty relativní permitivity ε' .
- 4) Hysterezní smyčku překopírujeme z obrazovky osciloskopu na průsvitný papír. Stanovíme délky A a B , plochu smyčky zjistíme planimetrem. Dosazením zjištěných údajů do (11) vypočítáme ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$. Ostatní hodnoty ztrátového činitele stanovíme s využitím počítače.

- 5) Měření podle bodu 3) opakujeme pro všechny předepsané teploty a hodnoty napětí.
- 6) Zjištěné hodnoty zapíšeme do tabulky a vyneseme předepsané grafické závislosti.