

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**

**Stavebná fakulta**

Evidenčné číslo: SvF-5342-7455

# **Piezoelektrická analýza MEMS tlakového snímača pomocou programu ANSYS**

**Bakalárska práca**

Študijný program: matematicko-počítačové modelovanie

Číslo študijného odboru: 1114

Názov študijného odboru: 9.1.9 aplikovaná matematika

Školiace pracovisko: Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

**Bratislava 2013**

**Matej Lukáč**



## ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Matej Lukáč**  
ID študenta: 7455  
Študijný program: matematicko-počítačové modelovanie  
Študijný odbor: 9.1.9 aplikovaná matematika  
Vedúci práce: doc. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.  
Pedagogický vedúci práce: prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.  
Miesto vypracovania: Oddelenie aplikovanej mechaniky a mechatroniky, UEAE, FEI STU Bratislava

Názov práce: **Piezoelektrická analýza MEMS tlakového snímača pomocou programu ANSYS**

Špecifikácia zadania:

1. Fyzikálny a matematický opis piezoelektrického javu
2. Prehľad MEMS (mikro-elektro-mechanických systémov) využívajúcich piezoelektrický jav
3. Vytvorenie MKP modelu piezoelektrického MEMS snímača v programe ANSYS
4. Simulácia modelu snímača pre rôznu veľkosť kontaktnej plochy

Rozsah práce: 30 strán

Riešenie zadania práce od: 04. 03. 2013

Dátum odovzdania práce: 17. 05. 2013

L. S.

**Matej Lukáč**  
študent

**prof. Ing. František Janíček, PhD.**  
vedúci pracoviska

**prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.**  
garant študijného programu

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Čestne prehlasujem, že na bakalárskej práci som pracoval samostatne na základe vlastných teoretických a praktických poznatkov, konzultácií a štúdia odbornej literatúry, ktorej úplný prehľad je uvedený v zozname použitej literatúry.

V Bratislave dňa 5.5.2013

.....

podpis študenta

Touto cestou vyslovujem poďakovanie pánovi doc. Ing. Vladimírovi Kutišovi, PhD. za pomoc, odborné vedenie, cenné rady a pripomienky pri vypracovaní mojej bakalárskej práce.

## **ABSTRAKT**

Matej Lukáč: Piezoelektrická analýza MEMS tlakového snímača pomocou programu ANSYS  
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta  
Bakalárska práca, 26 strán, 1 príloha

Cieľom práce je MKP analýza modelu piezoelektrického MEMS tlakového snímača v programe ANSYS. Snímač je zhotovený ako AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> kruhový tranzistor s vysokou pohyblivosťou elektrónov. V práci sú detailne rozobraté dve geometrie snímača, kruhová a prstencová. V úvode sa oboznámime s aplikáciou a praktickým využitím modelovaného snímača v praxi. Prvé dve kapitoly nás uvedú do problematiky piezoelektrického javu a MEMS systémov. Tretia kapitola je venovaná MKP simulácií oboch tvarov snímačov v programe ANSYS pri ktorej je nájdená optimálna poloha elektródy pre jednotlivé tvary snímača. Následne je pomocou softvéru Mathematica vytvorený program, ktorý umožňuje jednoducho počítať optimálnu polohu elektródy pre jej rôznu šírku.

**Kľúčové slová:** MKP analýza, MEMS tlakový snímač, piezoelektrická analýza

## **ABSTRACT**

Matej Lukáč: Piezoelectric analysis of MEMS pressure sensor using ANSYS software  
Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering  
Bachelor thesis, 26 pages, 1 supplement

The aim of the work is FEM analysis of piezoelectric MEMS pressure sensor model in ANSYS. The sensor is circular high electron mobility transistor (C-HEMT) structure based on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> materials. The sensor comes in two different geometries as a circular sensor or ring sensor structure. Introduction acquaints us with application and practical usage of mentioned sensor. First two chapters specifies the nature of piezoelectric effect and MEMS systems. Third chapter is dedicated to FEM simulation of both pressure sensor geometries in ANSYS software, in which we collect data for determining the optimal position of electrode for both types of geometry. Subsequently the program in software Mathematica is developed. This program allows us to calculate the optimal position of electrode for different range of contact area.

**Key words:** FEM analysis, MEMS pressure sensor, piezoelectric analysis

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2 Piezoelektricitá</b>	<b>11</b>
2.1 Úvod do piezoelektricity . . . . .	11
2.1.1 História piezoelektricity . . . . .	11
2.1.2 Technická aplikácia piezoelektrického javu . . . . .	12
2.2 Fyzikálny a matematický popis piezoelektrického javu . . . . .	13
2.2.1 Ferroelektricitá . . . . .	13
2.2.2 Curieho teplota . . . . .	13
2.2.3 Polarita . . . . .	13
2.2.4 Piezoelektrický efekt v piezoelektrických materiáloch . . . . .	14
2.2.5 Piezoelektrické konštitutívne rovnice . . . . .	15
2.3 Piezoelektrické koeficienty . . . . .	18
2.3.1 Piezoelektrická konštantá $d_{ij}$ . . . . .	18
2.3.2 Piezoelektrická konštantá $g_{ij}$ . . . . .	19
2.3.3 Konštantá elasticity $S_{ij}$ . . . . .	19
2.3.4 Dielektrický koeficient $\epsilon_{ij}$ . . . . .	19
2.3.5 Piezoelektrický párovací koeficient $k_{ij}$ . . . . .	20
2.4 Piezoelektrický senzor . . . . .	20
<b>3 Mikroelektromechanické systémy - MEMS</b>	<b>22</b>
3.1 Úvod do technológie MEMS systémov . . . . .	22
3.1.1 Mikrosenzory . . . . .	23
3.1.2 Mikroaktuátory . . . . .	23
3.1.3 Aplikácia MEMS . . . . .	23
3.1.4 Výroba mikroelektroniky . . . . .	23
3.2 AlGaN a GaN HEMT . . . . .	24
3.2.1 HEMT . . . . .	24
3.2.2 AlGaN, GaN . . . . .	24
<b>4 MKP Analýza MEMS tlakového snímača</b>	<b>25</b>
4.1 Geometria zariadenia . . . . .	25
4.2 Materiálové vlastnosti . . . . .	26
4.3 Definovanie počiatočného stavu . . . . .	27
4.4 Výpočtová geometria snímača . . . . .	28
4.5 Simulácia . . . . .	30
4.6 Dosiahnuté výsledky . . . . .	31
<b>5 Záver</b>	<b>36</b>
<b>Literatúra</b>	<b>37</b>

## ZOZNAM PRÍLOH

A: Tabuľky simulovaných hodnôt

# 1 Úvod

MEMS, alebo mikroelektromechanické systémy tvoria základ pre výrobnú technológiu využívanú pri zostavovaní mikroskopických integrovaných zariadení alebo systémov, ktoré kombinujú mechanické a elektronické komponenty. Zariadenia tvorené mikro-elektro-mechanickými systémami založenými na báze AlGaIn/GaN materiálov sľubujú široké uplatnenie v aplikáciách v prostredí, kde zariadenia z iných menej odolných materiálov nedokážu pracovať. Tieto materiály disponujú veľkou tepelnou, mechanickou a fyzikálnou stabilitou. Piezoelektrické vlastnosti ich predurčujú na použitie v aplikáciách, kde sa vyžaduje meranie mechanického napätia. Skôr, ako sa MEMS zariadenia uvedú do výroby, je snaha získať pomocou simulácií detailnú analýzu o správaní sa systémov a tak eliminovať možnosť návrhov chybných systémov. Našou úlohou je analýza a optimalizácia polohy elektródy, na ktorej sa bude zbierať elektrický náboj indukovaný na membráne z piezoelektrického materiálu. Z charakteru úlohy sa ako najrozumnejšia voľba ukazuje použitie konečno prvkovej analýzy v programe ANSYS. Na to, aby sme dosiahli čo najpresnejšie výsledky, je potrebné simulovať obe geometrie snímača a určiť počiatočné podmienky úlohy čo najpresnejšie. Cieľom práce je piezoelektrická analýza membrány, ktorá je predpätá z dôvodu nerovnakého usporiadania atómov v mriežke jednotlivých vrstiev. Zo simulácie bude možné určiť priebeh indukovaného náboja na membráne. Pomocou nasimulovaných dát budeme jednoducho vedieť určiť presnú polohu ľubovoľne veľkej elektródy. Týmto získame dôležité informácie pre optimalizáciu výroby mikro-elektro-mechanických systémov pozostávajúcich z piezoelektrických snímačov uvedeného typu. V úvode práce sa oboznámime s aplikáciou a praktickým využitím modelovaného snímača v praxi. Prvé dve kapitoly nás uvedú do problematiky piezoelektrického javu a MEMS systémov. Tretia kapitola je venovaná MKP simulácií oboch tvarov snímačov v programe ANSYS, pri ktorej je nájdená optimálna poloha elektródy pre jednotlivé tvary snímača. Následne je pomocou softvéru Mathematica vytvorený program, ktorý umožňuje jednoducho počítať optimálnu polohu elektródy pre jej rôznu šírku.



## 2 Piezoelektricitá

### 2.1 Úvod do piezoelektricity

#### 2.1.1 História piezoelektricity

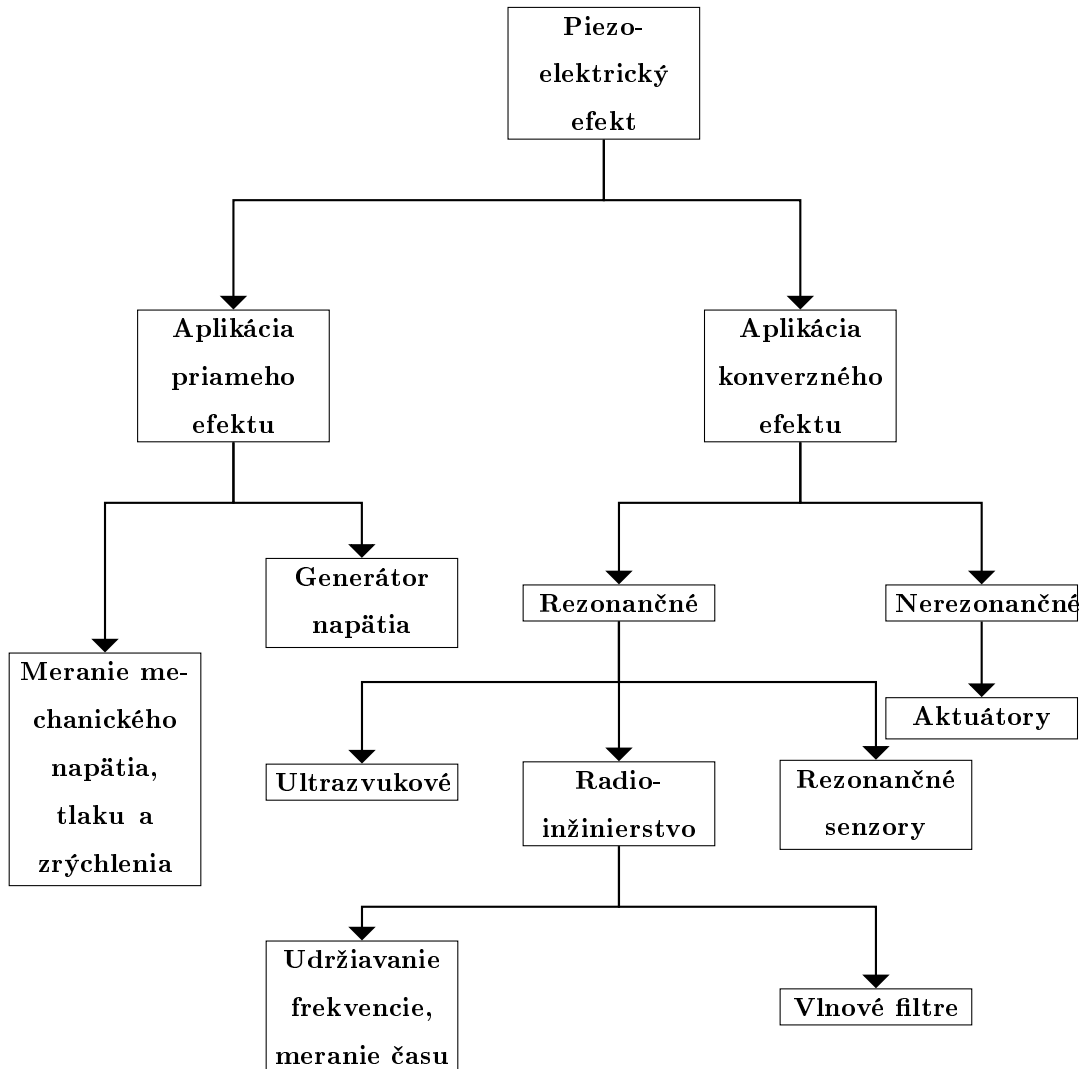
Prvé experimentálne dôkazy spojenia medzi piezoelektrickým javom a kryštalickou štruktúrou látky boli opísané bratmi Pierreom a Jacquesom Curieovcami v roku 1880 [5]. Ich experiment pozostával z merania elektrického náboja uvoľňovaného z povrchu špeciálne upravených krištáľov pri pôsobení mechanického napätia. Na svoje experimenty použili kryštály látok ako sú kremeň, turmalín, trstinový cukor alebo Seignetová soľ. Vo svojich štúdiách si všimli aj silnú závislosť medzi piezoelektrickými vlastnosťami testovanej vzorky kryštálu od rezu materiálu, ktorý skúmali. Práve závislosťou od rezu skúmanou látkou potvrdili domnienky o tom, že piezoelektrický jav je spôsobený práve nesymetrickým uložením atómov látky v kryštalickej mriežke. Napriek svojmu objavu si ale nevšimli ďalší zaujímavý fenomén a tým bol takzvaný konverzný piezoelektrický efekt. Pri konverznom efekte sa zavedením elektrického náboja na kryštál objaví povrchové napätie, a teda deformácia skúmanej látky. Táto vlastnosť bola pôvodne odvodená iba matematicky v roku 1881 na základe termodynamického zákona matematikom Gabrielom Lippmannom. Na základe jeho matematického dôkazu bratia Curieovci bezprostredne potvrdili existenciu konverzného efektu. Počas nasledujúcich rokov európska vedecká komunita pripravila základ pre identifikáciu piezoelektrických kryštáľov a využitia piezoelektrického javu. Do roku 1910 bola Woldemarom Voigtom spísaná kniha Lehrbuch der Kristallphysik obsahujúca všetky dovtedajšie poznatky z oblasti piezoelektricity. Piezoelektricitá, ako oblasť výskumu, mala značné problémy, aby udržala pozornosť vedcov a presvedčila odbornú verejnú o jej praktickej aplikovateľnosti. Vyvíjala sa popri elektromagnetizme, ktorý narozdiel od piezoelektricity produkoval viditeľné a prakticky aplikovateľné výsledky, čo sa o piezoelektricitu v tej dobe povedať nedalo.

Piezoelektrický jav sa dočkal praktického využitia až v roku 1917 počas prvej svetovej vojny ako ponorný ultrazvukový detektor. Bolo to zariadenie tvorené tenkou mozaikou kryštáľov kremeňa zlepených medzi dve oceľové platne. Pomocou takéhoto zariadenia dokázali vyslať vysokofrekvenčný zvuk pod morskou hladinou a pomocou neho zmerať hĺbku. Tento mechanizmus sa stal odrazovým mostíkom pre tvorbu sonarových meničov, obvodov a materiáľov, ktorý neunikol pozornosti vedcov. Ďalšie výskumy viedli k vyvinutiu rôznych laboratórne vytvorených materiáľov, ktoré mali lepšie vlastnosti ako prírodné kryštály. To dopomohlo k tvorbe mnohých zariadení a do roku 1965 boli svetu známe zariadenia ako sú výkonné sonary, piezozapaľovacie systémy, malé výkonné mikrofóny a mnohé iné.

V tejto dobe, japonský vedci dokázali vyvinúť nové materiály pomocou ktorých mohli vyvinúť piezokeramické filtre signálu potrebné pre rýchlo sa rozvíjajúci televízny a komunikačný priemysel. Práve Japonsko zaznamenalo oproti zvyšku sveta najvýznamnejšie objavy v tejto oblasti. V súčasnosti je najrozšírenejším predmetom skúmania pohyb telies za pomoci piezoelektrického javu. Tu sa vedci snažia vyvinúť čo najlacnejší, najúspornejší a najodolnejší piezoelektrický motor alebo posuvné ramená.

### 2.1.2 Technická aplikácia piezoelektrického javu

Piezoelektrické materiály poskytujú široké spektrum uplatnenia. V technickej praxi nájde uplatnenie rovnako priamy, ako aj konverzný piezoelektrický efekt, čo je znázornené v Obr. 1.



Obr. 1: Technická aplikácia piezoelektrického javu.

Medzi hlavné oblasti využitia priameho piezoelektrického javu patrí generovanie elektrickej energie v zapaľovacích zariadeniach, funkcia snímača v tlakomeroch alebo využitie ako ultrazvukového vysielača v medicíne. Konverzný efekt je využívaný ako základ pohonnej jednotky pre mikroštruktúry. Využíva sa aj ako tzv. piezomotor, kde sa na základe zmeny tvaru piezoelektrického materiálu dosahuje rotačný pohyb rotoru. Konverzný efekt našiel uplatnenie aj pri tvorbe reproduktorov v mobilných telefónoch. Kombinácia oboch efektov umožnila využitie piezoelektrického materiálu v oblasti aktívneho tlmenia. Kremenné oscilátory sa využívajú ako časovacie zariadenia v mikroelektronike.

## 2.2 Fyzikálny a matematický popis piezoelektrického javu

Piezoelektrické materiály sa radia medzi takzvané „smart“ materiály [6]. Tieto sa vyznačujú schopnosťou výrazne reagovať na podnety rôznej fyzikálnej povahy. Tieto reakcie sú veľmi významné pre mnohé inžinierske aplikácie. Patria sem napr. fotoelasticita, teplotná rozťažnosť, fotovoltaiický efekt alebo pyroelektricitá. V Tab. 1 je prehľad reakcií, ktoré na základe rôznych podnetov „smart“ materiály vykazujú.

Reakcia Podnet	Pretvorenie	El. náboj	Mag.pole	Teplota	Svetlo
Napätie	Elasticita	Piezo- elektricitá	Magneto- štrikcia	-	Fotoelasticita
Elektrické pole	Piezo- elektricitá	Permitivita	Elektro- magnetizmus	Termo- elektricitá	Elektro- optický efekt
Magnetické pole	Magneto- štrikcia	Magneto- elektrický efekt	Permeabilitá	-	Magneto- optiká
Teplo	Teplotná roz- ťažnosť	Pyroelektricitá	-	Špecifické teplo	-
Svetlo	Fotoštrikcia	Fotovoltaiický efekt	-	-	Index refrak- cie

Tab. 1: Podnety a reakcie [6]. Takzvané „smart“ materiály zodpovedajú nediagonálnym členom.

### 2.2.1 Ferroelektricitá

Feroelektrický kryštál je definovaný ako kryštál, ktorý vykazuje prirodzený elektrický dipólový moment [2]. To znamená, že aj pri absencii elektrického poľa oblasť s kladným nábojom v telese nesúhlasí s oblasťou so záporným nábojom. Je známe, že všetky ferroelektrické materiály sú aj piezoelektrické no opačná implikácia neplatí.

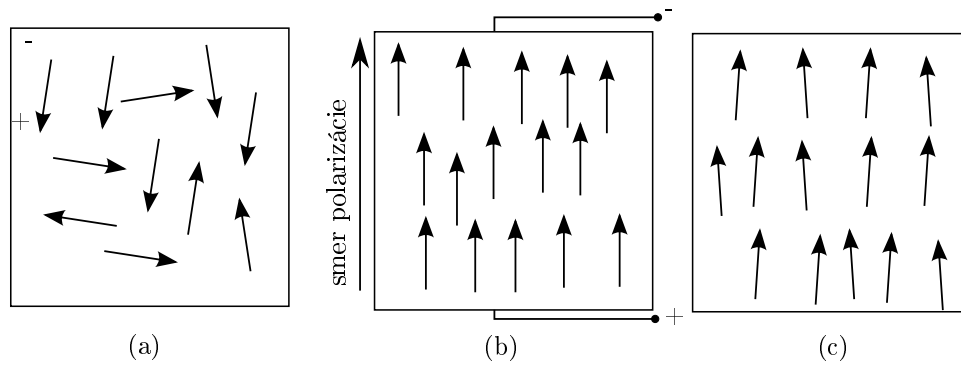
### 2.2.2 Curieho teplota

Curieov bod, alebo Curieho teplota  $T_c$  je jednou z charakteristických vlastností ferroelektrických teda feromagnetických a piezoelektrických látok [2]. Nad touto teplotou zaniká feroelektricitá, teda u piezoelektrických látok piezoelektrický efekt.

### 2.2.3 Polarita

Piezoelektrické materiály delíme do dvoch skupín. Prvá skupina obsahuje piezoelektrický kryštalický kremeň, zatiaľ čo druhá skupina je založená na báze piezoelektrickej keramiky PZT a fluoropolymér PVDF [2]. Pri keramickom materiáli sú kryštály uložené náhodne, a teda aj napriek faktu, že

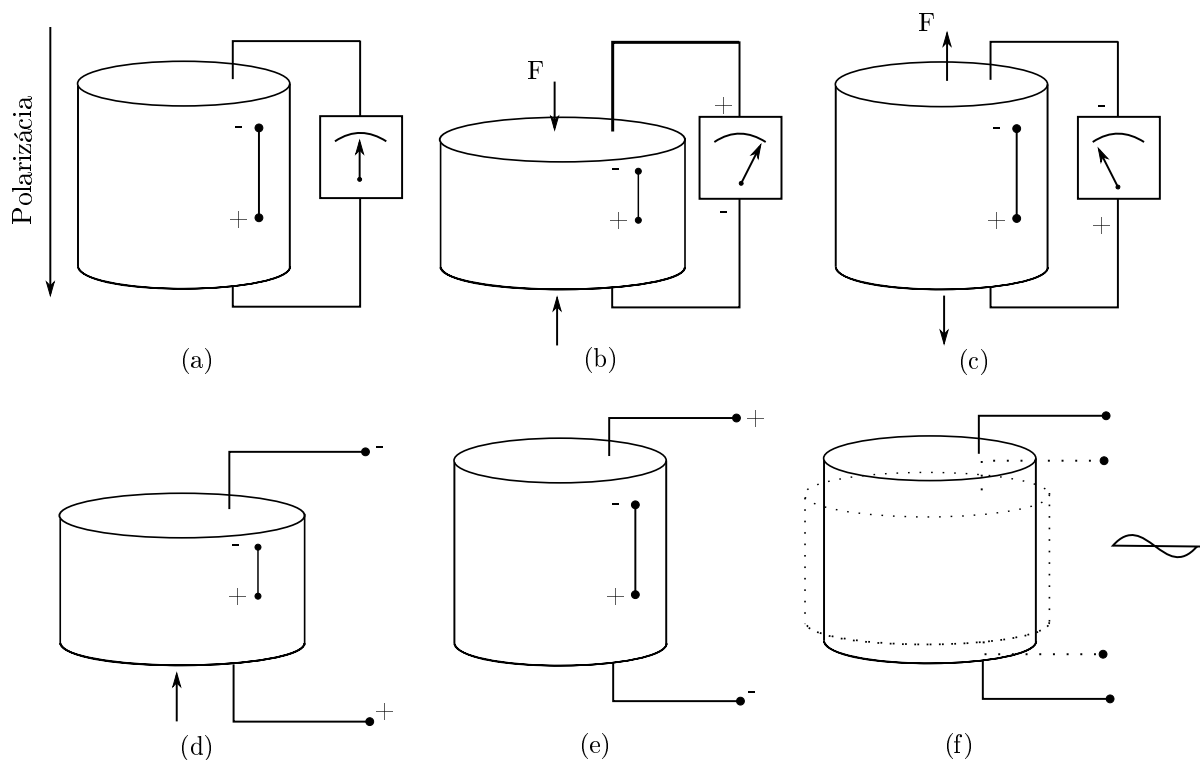
jednotlivé kryštály môžu byť silne piezoelektrické, vysoká neusporiadanosť uloženia má za následok, že sa jednotlivé vlastnosti vyrušia. Aby sa keramický materiál správal ako piezoelektrický, je potrebné ho vložiť do elektromagnetického poľa, v ktorom sa na základe ferroelektrického efektu zoradí polarita osí kryštálov v keramike, a teda žiadne ďalšie vzájomné vyrušovanie už nebude mať efekt. Šípky predstavujú polaritu osí kryštálov v keramike. Tento proces sa nazýva polarizácia [7] Obr. 2.



Obr. 2: Proces polarizácie: (a) Pred polarizáciou sú oblasti orientované náhodne; (b) Silné jednosmerné elektrické pole použité na polarizáciu; (c) Po odstránení elektrického poľa sa polarizácia zachováva.

#### 2.2.4 Piezoelektrický efekt v piezoelektrických materiáloch

Podľa Hookovho zákona, pri nepiezoelektrických pevných materiáloch napätie v ťahu spôsobuje iba predĺženie v smere tohto napätia. Pri piezoelektrickom materiáli aplikované napätie navyše indukuje elektrický náboj [2]. Celkové pretvorenie má vplyv na veľkosť indukovaného elektrického náboja, a naopak, veľkosť náboja má vplyv na výsledný tvar deformovaného telesa z piezoelektrického materiálu.

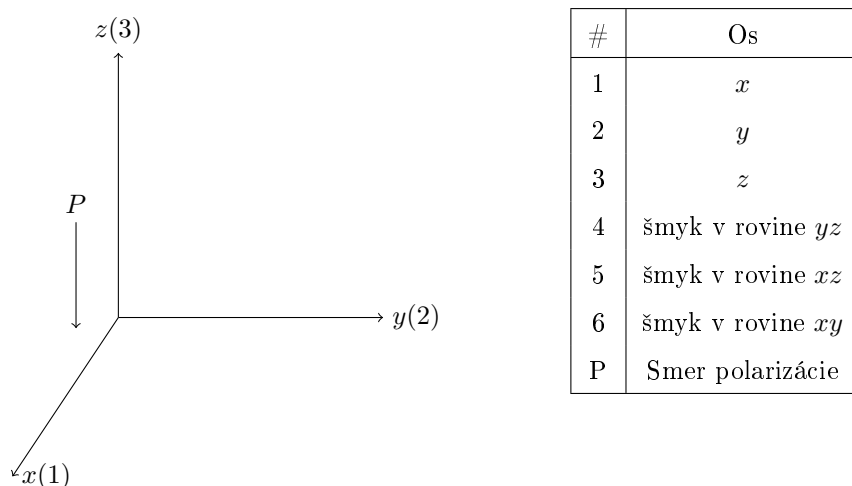


Obr. 3: Piezoelektrický efekt na valec z keramického piezoelektrického materiálu

Obr. 3 nám názorne približuje, aký efekt má piezoelektrický jav na valec z piezoelektrického materiálu. Na Obr. 3a vidíme stav, ktorý nieje zaťažný ani mechanickým napätím ani elektrickým nábojom. Na Obr. 3b vidíme, že pri zaťažení tlakom v smere polarizácie, materiál produkuje kladný elektrický náboj. Pri zaťažení ťahom (Obr. 3c) ukazuje indukované záporného náboja. Na Obr. 3d a Obr. 3e vidíme, že ak na piezoelektrický materiál aplikujeme elektrické pole s intenzitou  $E$  získame jemu úmerné mechanické pretvorenie. Toto pretvorenie spôsobené napätím závisí na polarite. Ďalej na Obr. 3f vidíme, že kontrakcia a expanzia materiálu bude viditeľná, ak aplikujeme sínusoidálne elektrické pole.

### 2.2.5 Piezoelektrické konštitutívne rovnice

Matematicky je piezoelektrický jav popísaný konštitutívnymi rovnicami, ktoré pre piezoelektrický materiál pomocou vektora napätia, vektora deformácie, vektora elektrického posunutia a vektora elektrickej intenzity definujú vzájomné vzťahy. Ukazuje sa, že pri malých elektrických poliach a malých mechanických napätiach majú piezoelektrické materiály lineárny profil [7]. Tento predpoklad budem využívať aj vo svojej práci. Na tomto predpoklade je vybudovaná teória konštitutívnych rovníc popisujúcich piezoelektrický jav. Ďalej sa predpokladá, že celkové pretvorenie materiálu je sumou mechanického pretvorenia vyvolaného mechanickým napätím a pretvorením spôsobeným aplikovaním elektrického napätia. Z dôvodu indexového zápisu tenzorov využívame v popise číslovanie osí ako na Obr. 4.



Obr. 4: Popis použitého súradnicového systému.

Elektromechanické rovnice popisujúce lineárny piezoelektrický materiál majú tvar:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} \sigma_i + \xi_{ik}^\sigma E_k \quad (2)$$

kde indexy  $i, j = 1, 2, \dots, 6$  a  $m, k = 1, 2, 3$  zodpovedajú rôznym smerom v rámci súradnicového systému materiálu, zobrazenom na predošlom obrázku. Dané rovnice vieme prepísať do tvaru, ktorý je výhodnejší pre našu aplikáciu. Teda dostávame:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^D \sigma_j + g_{mi} D_m \quad (3)$$

$$E_i = g_{mi} \sigma_i + \beta_{ik}^\sigma D_k \quad (4)$$

kde:

$\sigma$ ... vektor napätia [ $N/m^2$ ]

$\varepsilon$ ... vektor pretvorenia[-]

$E$ ... vektor elektrickej intenzity [ $V/m$ ]

$\xi$ ... permitivita [ $F/m$ ]

$d$ ... matica piezoelektrických konštánt pre pretvorenie [ $m/V$ ]

$S$ ... matica kompliančných koeficientov (inverzná k matici tuhosti) [ $m^2/N$ ]

$D$ ... vektor elektrickej indukcie [ $C/m^2$ ]

$g$ ... matica piezoelektrických konštánt [ $m^2/C$ ]

$\beta$ ... impermitivita [ $m/F$ ]

Veličiny s horným indexom  $D, E$  a  $\sigma$  reprezentujú experimentálnymi meraniami získané hodnoty pri konštantnom elektrickom posunutí, elektrickom poli a pri konštantnom napätí. Rovnice (1) a (3)

vyjadrujú konverzný piezoelektrický efekt. To znamená, že modelujú situáciu, v ktorej je zariadenie využívajúce piezoelektrický efekt v úlohe aktuátora. Na druhej strane rovnice (2) a (4) popisujú priamy piezoelektrický efekt, a teda zariadenie, ktoré je využívané ako senzor. Konverzný efekt sa často používa pri získavaní piezoelektrických koeficientov. Po prepísaní rovníc (1) až (4) do maticového tvaru získavame:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & e_{12}^\sigma & e_{13}^\sigma \\ e_{21}^\sigma & e_{22}^\sigma & e_{23}^\sigma \\ e_{31}^\sigma & e_{32}^\sigma & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Piezoelektrický materiál je transversálne izotropný. Predpokladajúc, že materiál je polarizovaný pozdĺž osi 3, mnoho parametrov vyššie uvedených matíc je buď nulových alebo závislých na ostatných parametroch. Presnejšie nenulové koeficienty kompliancej matice sú:

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} \\ S_{13} &= S_{31} = S_{23} = S_{32} \\ S_{12} &= S_{21} \\ S_{44} &= S_{55} \\ S_{66} &= 2(S_{11} - S_{12}) \end{aligned}$$

nenulové piezoelektrické konštanty matice pretvorenia sú:

$$\begin{aligned} d_{31} &= d_{32} \\ d_{15} &= d_{24} \end{aligned}$$

a nenulové dielektrické koeficienty:

$$\begin{aligned} e_{11}^\sigma &= e_{22}^\sigma \\ e_{33}^\sigma \end{aligned}$$

Toto nám zjednoduší rovnice (5) a (6) do tvaru:

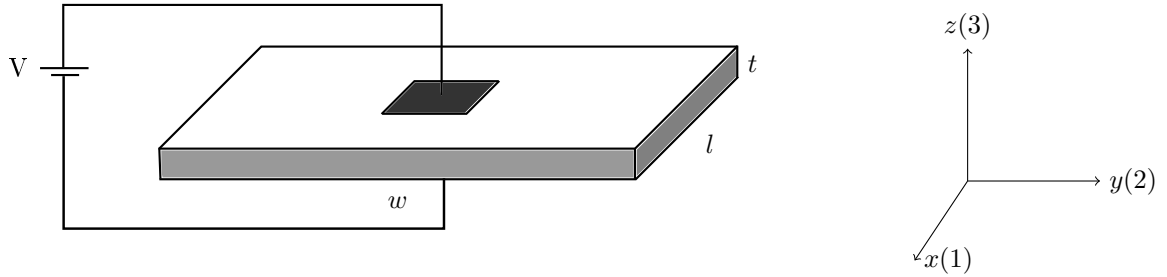
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

a

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & e_{22}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.3 Piezoelektrické koeficienty

### 2.3.1 Piezoelektrická konštanta $d_{ij}$



Obr. 5: Postavenie piezoelektrického snímača pre meranie konštanty  $d_{31}$ .

Piezoelektrická konštanta  $d_{ij}$  označuje pomer pretvorenia v smere osi  $j$  k veľkosti intenzity elektrického poľa aplikovaného v smere osi  $i$ , pričom všetky vonkajšie napätia sú zachované konštantné. Na Obr. 5 aplikujeme napätie  $V$  na piezoelektrickú platňu polarizovanú v smere osi 3. Napätie generuje elektrické pole

$$E_3 = \frac{V}{t},$$

ktoré pretvorí platňu. Presnejšie

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta_l}{l},$$

kde  $\Delta_l$  je vyjadrená ako

$$\Delta_l = \frac{d_{31} V l}{t}.$$

Piezoelektrická konštanta  $d_{31}$  je zvyčajne záporné číslo. To je spôsobené tým, že aplikácia kladného elektrického poľa spôsobí kladné pretvorenie v smere 3.



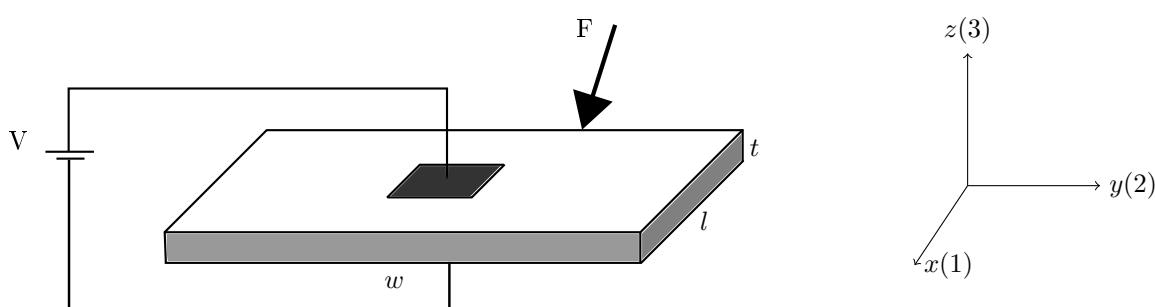
### 2.3.2 Piezoelektrická konštanta $g_{ij}$

Piezoelektrická konštanta  $g_{ij}$  vyjadruje elektrické pole indukované v smere osi  $i$ , keď je materiál deformovaný v smere osi  $j$ . Na Obr. 6 aplikovaná sila  $F$  v smere osi  $x$  spôsobuje elektrické napätie

$$V = \frac{g_{31}F}{w}.$$

Iná interpretácia zápisu  $g_{ij}$  je, že pomer pretvorenia v smere osi  $j$  k náboju vzniknutom na elektródach rovnobežných k  $i$ . Podľa obrázku vieme vyjadriť, že keď sa na elektródach indukuje náboj  $Q$ , hrúbka piezoelektrického materiálu sa zmení o

$$\Delta t = \frac{g_{31}Q}{w}.$$



Obr. 6: Piezoelektrický snímač s voľnými elektródami pri sile  $F$  aplikovanej v smere 1. Rovnako veľká opačná sila nie je zobrazená.

### 2.3.3 Konštanta elasticity $S_{ij}$

Konštanta  $S_{ij}$  je pomer pretvorenia v smere  $i$  k napätiu v smere  $j$ , pričom v ostatných dvoch smeroch nedochádza ku zmene napätia. V zápise, kde používame označenie  $S_{ij}^E$  znamená horný index  $E$ , že elastická poddajnosť je meraná na elektródach, ktoré majú nulový potenciál. Rovnako  $D$  pri  $S_{ij}^D$  značí, že pri meraní neboli elektródy spojené. Tu je očividné, že  $S_{ij}^E < S_{ij}^D$ , a teda piezoelektrický materiál so skratovanými elektródami má menší Youngov modul pružnosti ako materiál s nespojenými elektródami.

### 2.3.4 Dielektrický koeficient $e_{ij}$

Dielektrický koeficient určuje veľkosť elektrického náboja na jednotku plochy v smere osi  $i$  vzhľadom k aplikovanému elektrickému poľu zo smeru  $j$ . Vo väčšine piezoelektrických materiálov spôsobuje elektrické pole aplikované zo smeru  $j$  elektrickú indukciu iba v smere  $j$ . Relatívny dielektrický koeficient definujúci pomer absolútnej permitivity materiálu a permitivity okolitého prostredia je definovaný ako  $K$ . Horný index  $\sigma$  v  $e_{11}^\sigma$  zodpovedá permitivite poľa aplikovaného v smere  $i$ , keď materiál nie je vystavený mechanickému namáhaniu.

### 2.3.5 Piezoelektrický párovací koeficient $k_{ij}$

Piezoelektrický párovací koeficient  $k_{ij}$  udáva schopnosť piezoelektrického materiálu transformovať elektrickú energiu na mechanickú a naopak. Táto transformácia sa využíva pri oboch typoch piezoelektrických zariadení, či už ide o senzory alebo o aktuátory. Index  $j$  označuje pretvorenie v smere osi  $j$ , pričom elektródy sú kolmé na smer  $i$ . Existuje mnoho spôsobov určenia párovacieho koeficientu. Jednou z možností je zaťaženie piezoelektrického materiálu, pričom sa elektródy vodivo nespoja. Piezoelektrický materiál sa stlačí, podobne ako pružina. Toto stlačenie označíme  $\Delta z$  a mechanická práca potrebná na stlačenie je popísaná nasledovne:

$$W_M = \frac{F\Delta z}{2}.$$

Piezoelektrický efekt spôsobí, že elektrický náboj  $Q$  sa akumuluje na elektródach vo forme elektrickej energie

$$W_E = \frac{Q^2}{2C_p}.$$

Kde  $C_p$  je kapacitancia piezoelektrického senzora. Z toho vyplýva

$$k_{33} = \sqrt{\frac{W_E}{W_M}} = \frac{Q}{\sqrt{F\Delta z C_p}}.$$

Párovací koeficient je možné vyjadriť pomocou ostatných piezoelektrických konštánt. Môžeme napísať

$$k_{ij}^2 = \frac{d_{ij}^2}{S_{ij}^E e_{ij}^\sigma} = g_{ij} d_{ij} E_p,$$

kde  $E_p$  je Youngov modul pružnosti piezoelektrického materiálu. Keď aplikujeme silu na piezoelektrický snímač, v závislosti od toho, či sú elektródy skratované alebo nie, pozorujeme rôznu tuhosť materiálu. Presnejšie pri skratovaných elektródach je zariadenie poddajnejšie ako zariadenie s neskratovanými elektródami. To je spôsobené tým, že pri pôsobiacej sile sa náboj opačnej hodnoty na elektródach vyruší. Ak by sme označili tuhosť materiálu so skratovanými elektródami  $K_s$  a tuhosť materiálu s neskratovanými elektródami  $K_n$ , vieme ukázať, že platí vzťah

$$\frac{K_n}{K_s} = \frac{1}{1 - k^2}.$$

## 2.4 Piezoelektrický senzor

Keď je na piezoelektrický prevodník aplikované mechanické napätie, generuje elektrické napätie. Toto je zabezpečené priamym piezoelektrickým efektom. Táto vlastnosť robí piezoelektrický prevodník vhodným pre aplikácie, kde je potrebné merať mechanické napätie. Ak je piezoelektrický senzor vystavený tlaku, predpokladajúc nulové elektrické pole, výsledný vektor elektrického posunutia je:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}.$$

Generovaný náboj vieme určiť zo vzťahu:

$$Q = \int \int \int [D_1 \ D_2 \ D_3] dA_1 dA_2 dA_3,$$

kde  $A_1, A_2$  a  $A_3$  sú plochy elektród, v rovinách 23,13 a 12. Generované napätie  $V_p$  je závislé na náboji vzťahom

$$V_p = \frac{Q}{C_p},$$

kde  $C_p$  je kapacitancia piezoelektrického senzora. Ak máme namerané napätie  $V_p$ , pretvorenie vieme vypočítať z hore uvedeného integrálu.

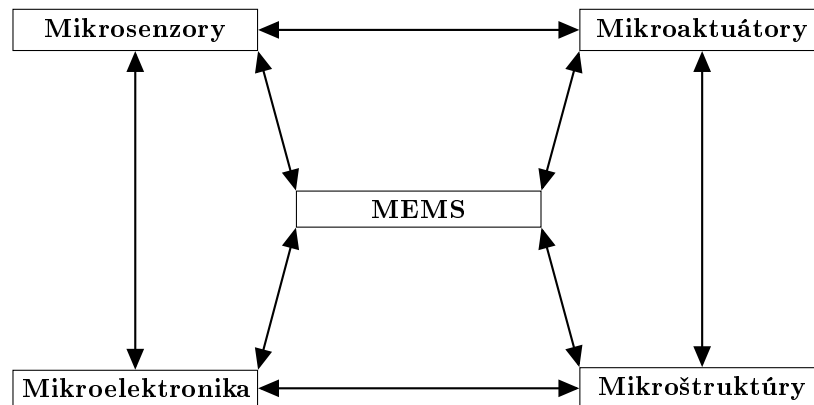
### 3 Mikroelektromechanické systémy - MEMS

#### 3.1 Úvod do technológie MEMS systémov

MEMS alebo mikroelektromechanické systémy tvoria základ pre výrobnú technológiu využívanú pri zostavovaní mikroskopických integrovaných zariadení alebo systémov, ktoré kombinujú mechanické a elektronické komponenty [4]. Tie sú vytvárané pomocou integrovaných obvodov, dávkovacích výrobných techník a môžu dosahovať veľkosti od pár mikrometrov až po niekoľko milimetrov. Tieto zariadenia alebo systémy majú schopnosť snímania, kontroly alebo akčného pohybu v mikroskopickej škále, no môžu vytvárať efekt aj v makroskopickej škále.

Interdisciplinárna povaha mikroelektromechanických systémov využíva dizajn, techniku a výrobné postupy zo širokej škály technických odvetví. Pri tvorbe MEMS sa stretne výrobná technológia integrovaných obvodov, mechanické, elektronické, chemické inžinierstvo a optika, aby spolu vytvorili systém vhodný na vykonávanie požadovanej činnosti. Zložitosť mikroelektromechanických systémov je viditeľná aj na širokej škále ich využitia (Tab. 2). Svoje uplatnenie nájdu v automobilovom, elektronickom, komunikačnom priemysle, ako aj v medicínskych a armádnych aplikáciách. Ako príklady môžu byť uvedené senzory airbagov, tlačiarenské hlavy, čítacie hlavy pamäťových diskov alebo senzory tlaku krvi. MEMS bývajú taktiež označované za najnádejnejšiu technológiu 21. storočia.

V najzákladnejšej forme, MEMS pozostávajú z mechanických mikroštruktúr, mikrosenzorov, mikroaktuátorov a mikroelektroniky, vzájomne integrovaných do spoločného silikónového čipu.



Obr. 7: Schematická ilustrácia MEMS komponentov [4]

Ako je uvedené na Obr. 7, komponenty, ktoré tvoria MEMS systémy sú:

- mikrosenzory
- mikroaktuátory
- mikroelektroniku
- mikroštruktúry

### 3.1.1 Mikrosenzory

Mikrosenzory sa využívajú na meranie fyzikálnych parametrov. Sú zamerané na pozorovanie dočasných vplyvov prostredia [3] a následnej kalibrácie nameraných hodnôt určenej pre podanie účelnej informácie. Základnou stavebnou jednotkou senzora je prevodník, čo je zariadenie vyvolávajúce merateľnú odozvu na zmenu fyzikálnych podmienok, akými sú napríklad teplota, tlak, vlhkosť alebo vibrácie. Túto odozvu ďalej transformujú na elektrický signál.

### 3.1.2 Mikroaktuátory

Aktuátor je kontrolné zariadenie, ktoré je schopné na základe podnetu spôsobiť pohyb inej časti zariadenia. Mnoho bežných technických systémov požaduje pohyb komponentov v mikroskopickej mierke [3]. Proces týchto mikropohybov sa nazýva mikroaktuácia. Mikroaktuátory tvoria vysoko presné zariadenia. Svoju aplikáciu nájdú napríklad pri pohybe nástrojov, pri mikrochirurgických zákrokoch a tam, kde sa vyžaduje vysoká kontrola a presnosť. Mikroaktuátory klasifikujeme do dvoch skupín na základe pohybu, ktorý vykonávajú. Translačný a rotačný. Oba pohyby je možné navzájom kombinovať za použitia prevodných komponentov.

### 3.1.3 Aplikácia MEMS

Automobily	Elektronika	Medicína	Komunikácia	Armáda
Navigačné senzory	Hlavy pamäťových zariadení	Senzor krvného tlaku	Optické sieťové komponenty	Navádzacie systémy
Senzor kompresora klimatizácie	Hlavy tlačiarňí	Svalové stimulatory	Rádiové relé, switche a filtre	Radarová technika
Senzory brzdné sily a nastavenie podvozku	Projektory	Implantované tlakové senzory	Projektory v prenosných komunikačných zariadeniach	Zapínacie systémy
Senzor stavu paliva	Senzory zemetrasenia	Systémy podávania liekov	Napätím kontrolované oscilátory	Zabudované senzory
Senzor airbagov	Letecké tlakové senzory	Miniatúrne analytické nástroje	Lasery	Letecká kontrola

Tab. 2: Aplikácia MEMS

### 3.1.4 Výroba mikroelektroniky

Mikroelektronika je jedným z najväčších objavov minulého storočia. Metóda výroby mikroelektronického zariadenia sa nazýva fabrikácia [3]. Fabrikácia je postupná procedúra. Medzi najdôležitej-

šie sekvencie výroby patrí príprava membrány, legovanie, litografia, leptanie a balenie. Všetky tieto procesy sú aplikované na membráne, ktorej hovoríme substrát. Substrát je hmota polovodičového materiálu, predovšetkým kryštalického kremíka. Jeden samotný dlhý substrát môže slúžiť ako základ pre fabrikáciu viacerých identických mikročipov. Preto fabrikačný proces integrovaných obvodov je proces dávkového spracovania.

Na substrát sa naniesie tenká membránová vrstva. Vlastnosti membrány sú prispôbované za pomoci legovania materiálu. Používajú sa dve legovacie metódy, a to tepelná difúzia a iónová implantácia. Nasledujúci proces sa nazýva litografia, čo označuje vytvorenie a následnú transformáciu maskovacieho vzoru. Masky, ktorá je predom vytvorená pozostáva zo skleneného plátu pokrytého vzorovanou vrstvou, zvyčajne chrómovým filmom. Vytvorenie masky spočíva v použití počítačom riadeného elektrónového lúča na fotografický materiál masky podľa požadovaných nastavení. Masky reprezentuje funkcie rôznych elementov a vrstiev čipu, ktoré majú byť vytvorené. Vzor z masky je následne vďaka fotorezistnej vlastnosti prenesený na film. Fotorezistný materiál je chemicky a svetelne senzitivný, pričom je nanosený na povrch tenkého filmu. Vlastnosti masky sú nanosené na film substrátu vystavením svetelne senzitivného fotorezistného materiálu cez priehľadné oblasti masky. Masky sa potom objavia na povrchu filmu. Keď je vzor nanosený na film, plochy substrátu nechránene fotorezistívnym materiálom sú odstránené leptaním. Leptanie je proces odstraňovania oblastí vrstvy pomocou chemických alebo elektrolytických zlúčenín. Následne sa membrána alebo substrát nareže na jednotlivé mikročipy. Následne sa mikročipy balia do ochranných puzdier.

## **3.2 AlGaN a GaN HEMT**

### **3.2.1 HEMT**

HEMT je skratka pre High Electron Mobility Transistor čo v preklade znamená tranzistor s vysokou pohyblivosťou elektrónov. Ide o unipolárne zariadenie alebo heteroštruktúru, ktorá využíva efekt poľa na zosilnenie elektrických signálov.

### **3.2.2 AlGaN, GaN**

Oba použité materiály, nitrid gália GaN aj nitrid gália s prímiesou hliníka AlGaN patria do triedy III-V nitridových polovodičov. Už dlhšiu dobu sú o III-V nitridových polovodičoch známe ich vynikajúce optické, elektronické, termálne a štrukturálne vlastnosti. Vysoká mechanická pevnosť, teplotná stabilita a biologická neškodnosť ich predurčujú na využitie pri vysokých teplotách a agresívnom chemickom prostredí. Pre našu aplikáciu nás zaujímajú hlavne ich piezoelektrické a mechanické vlastnosti.

## 4 MKP Analýza MEMS tlakového snímača

V rámci vedeckého projektu, na ktorom sa spolupodieľajú ÚE SAV, FEI STU a MLC sa vyvíjajú nové typy tlakových snímačov na báze AlGaN/GaN materiálov. Tvorbe a uvedeniu MEMS zariadenia do výroby predchádza komplexný postup. Postupne sa prechádza od návrhu modelu, simulácie a optimalizácie tvaru k zvládnutiu technológie výroby MEMS. Nasleduje výroba prototypov snímačov, na ktorých sa prevádzajú experimentálne merania a zisťovanie ich kompatibility s simulovanými hodnotami. Našou úlohou v tomto procese je práve realizácia piezoelektrickej simulácie a zistenie optimálnej veľkosti a polohy elektródy.

### 4.1 Geometria zariadenia

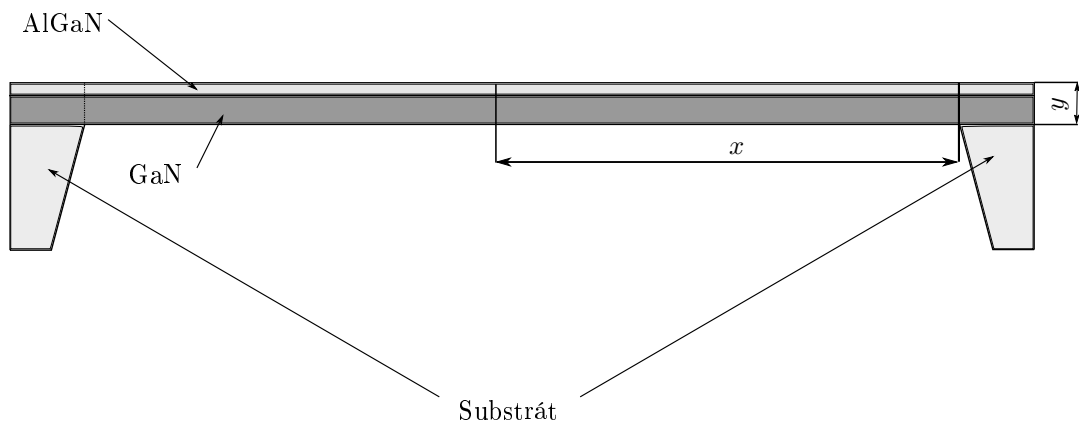
Snímač, ktorého piezoelektrické vlastnosti sú v práci skúmané, je vyhotovený v dvoch rôznych prevedeniach piezoelektrickej membrány. Bol vyhotovený buď ako kruhová membrána bez stredovej podpory, alebo ako prstencová membrána s pilierom v strede. Membrána je tvorená spojením dvoch materiálov. GaN, čo je nitrid gália a AlGaN, čo je GaN s prímiesou nitridu hliníka v určitom pomere podľa vzorca

$$AlGaN = k * AlN + (1 - k) * GaN$$

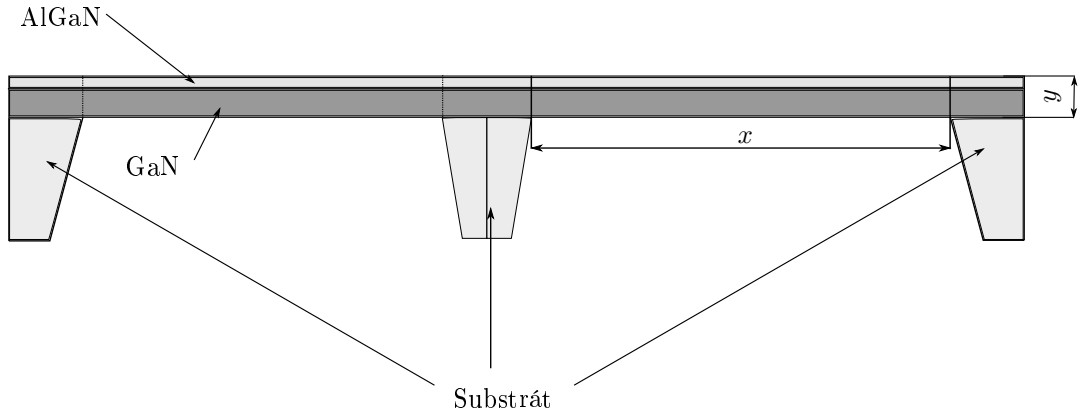
. V simuláciách sme pracovali s pomerom zmiešavania 25% AlN, teda konštanta  $k = 0,25$ . AlGaN tvorí piezoelektrickú vrstvu. Rozmery jednotlivých vrstiev membrány, ako aj celkový rozmer membrány, sú uvedené v Tab. 3 a zodpovedajú kóte  $y$  v Obr. 8 a Obr. 9.

Materiál	Hrúbka
GaN	1,9 $\mu\text{m}$
AlGaN	28 nm
GaN + AlGaN	1,928 $\mu\text{m}$

Tab. 3: Rozmery membrány senzora.



Obr. 8: Geometria snímača kruhového tvaru



Obr. 9: Geometria snímača prstencovitého tvaru

Membrána vzniká odleptaním silikónového substrátu. Týmto odleptaním sa dosiahne výsledný požadovaný tvar. Rozmery  $x$  a  $y$  z Obr. 8 a Obr. 9 sú uvedené v Tab. 4.

Tvar membrány	Kruhová	Prstencová
$x$	600 $\mu\text{m}$	180 $\mu\text{m}$
$y$	1,928 $\mu\text{m}$	1,928 $\mu\text{m}$

Tab. 4: Tabuľka rozmerov pre oba typy snímača

## 4.2 Materiálové vlastnosti

Pri simulácií snímača sú využívané tri typy materiálov - AlGaIn, GaN a AlN. Tieto tri materiály tvoria membránu pripevnenú na substráte tvorenom SiC, čo je karbid kremíku. Materiálové vlastnosti môžeme rozdeliť do dvoch skupín. Piezoelektrické vlastnosti a vlastnosti mechanické. Piezoelektrické vlastnosti sú definované iba pre AlGaIn vrstvu, mechanické vlastnosti majú všetky vrstvy tvoriace snímač. Pre štruktúrnu analýzu platí Hookov zákon v tvare

$$\sigma = C\varepsilon,$$

kde  $\sigma$  je tenzor mechanického napätia,  $\varepsilon$  je pomerné predĺženie a  $C$  je tenzor elasticity a je vyjadrený pre transverzálne izotropné materiály ako

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}.$$

Konštanta  $C_{66}$  je definovaná ako

$$C_{66} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}.$$



Jednotlivé mechanické vlastnosti pre materiály sú vyjadrené v Tab. 5.

Materiál	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$
AlN	410	149	108	330	125
GaN	390	145	103	405	105
AlGaIn	395	146	104,25	386,25	110

Tab. 5: Tabuľka mechanických vlastností použitých materiálov

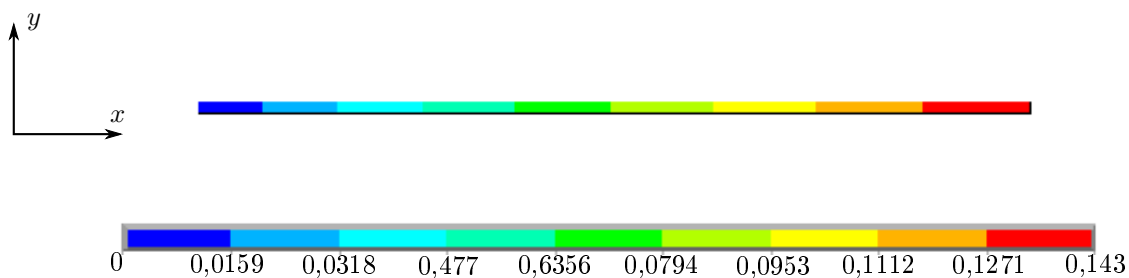
Piezoelektrické vlastnosti AlGaIn vrstvy membrány potrebné pre výpočet sú piezoelektrické koeficienty  $e_{ij}$  a relatívna permitivita  $\varepsilon_{pii}$  sú uvedené v Tab. 6.

Piezoelektrické koeficienty [pC/ $\mu\text{m}^2$ ]	Relatívna permitivita [-]
$e_{13} = -0,51$	$\varepsilon_{p11} = 8,9$
$e_{15} = 0,375$	$\varepsilon_{p22} = 8,9$
$e_{33} = 0,67$	$\varepsilon_{p33} = 8,9$

Tab. 6: Tabuľka elektrických vlastností AlGaIn materiálu

### 4.3 Definovanie počiatočného stavu

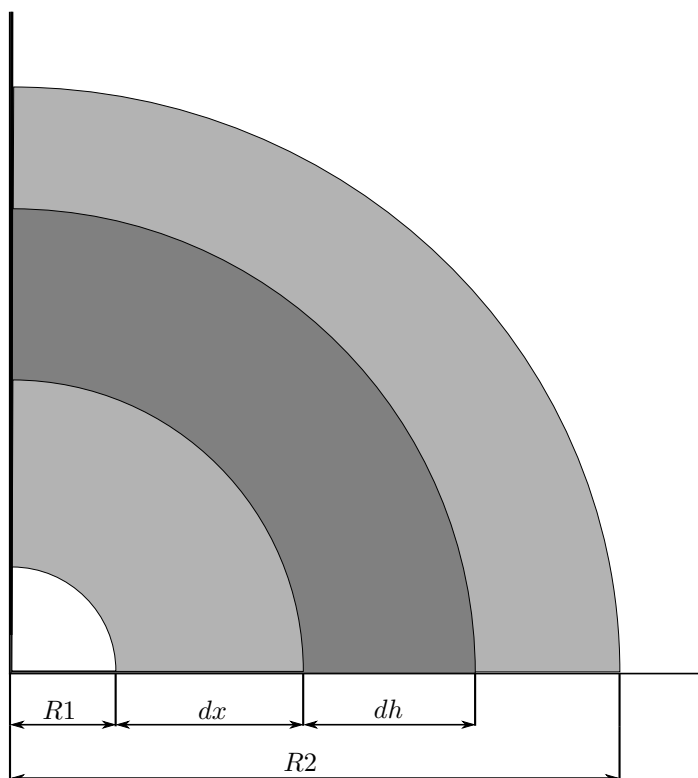
Pri tvorbe membrány, teda pri spájaní AlGaIn a GaN vrstiev vzniká na ich spojení napätie spôsobené rôznou kryštalickou mriežkou materiálov. Toto napätie medzi AlGaIn a GaN vrstvou bolo určené na základe Ramanovej spektroskopie. Výsledkom spektroskopie bolo, že membrána je pri výrobe zaťažená počiatočným ťahovým napätím 300MPa. Toto počiatočné napätie sme museli pri simulácií uviesť do výpočtov. Na to nám poslúžila funkcia softvéru ANSYS *inistate* [1]. Pomocou nej je definovaný počiatočný stav modelu. Ten sme museli najprv vyrátať. Keďže prstencový aj kruhový snímač sú osovo symetrické telesá, obmedzíme sa pri výpočte iba na obdĺžnikovú oblasť ohraničenú na Obr. 8 a Obr. 9 ako  $x$  a  $y$ . Pokusom sme zistili, že počiatočné napätie snímača 300MPa získame, ak zariadenie votkneme v smere  $x$  v počiatku, teda  $dx = 0$  pre  $x = R1$  a na druhom konci ( $x = R2$ ) predpíšeme posunutie  $dx = 0,143 \mu\text{m}$ .  $R1$  a  $R2$  sú konštanty definované v Tab. 7. Následne po vyriešení modelu (Obr. 10) uložíme napätia do súboru, čo nám umožní zadať počiatočný stav predopnutého modelu.



Obr. 10: Posunutie pri definovaní počiatočného napätia[ $\mu\text{m}$ ]

#### 4.4 Výpočtová geometria snímača

Osová symetria telesa nám veľmi zjednoduší výpočtovú geometriu. Na Obr. 11 je znázornená štvrtina snímača. Hodnoty parametrov sú uložené v Tab. 7.



Obr. 11: Výpočtová geometria snímača

$R1$  označuje vnútorný polomer membrány,  $dx$  je poloha ľavého konca elektródy,  $dh$  označuje šírku elektródy a  $R2$  je vonkajší polomer membrány. Pomocou takto parametricky definovanej geometrie je skript zadávajúci príkazy pre ANSYS ľahko upraviteľný pre rôzne vstupy.

Parameter	Prstencová mem- brána	Kruhová membrána
$R1$ [ $\mu\text{m}$ ]	60	0
$R2$ [ $\mu\text{m}$ ]	240	240
$dx$ [ $\mu\text{m}$ ]	5 - 170	5 - 235
$dh$ [ $\mu\text{m}$ ]	5	5

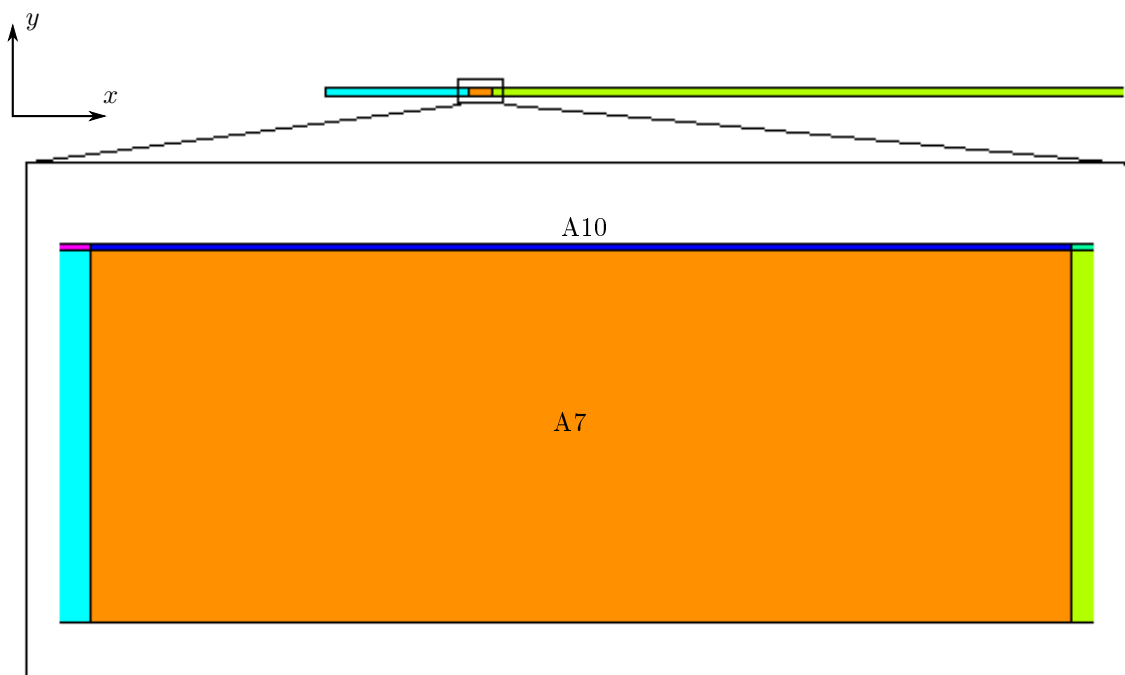
Tab. 7: Hodnoty parametrov

Nasledujúca úloha bola nájsť oblasť snímača, na ktorej bude na elektróde indukovaný čo najväčší elektrický náboj. To sme dosiahli simuláciou snímača pri konštantnej šírke elektródy a pri v cykle sa meniacej polohe elektródy. Tab. 8 udáva počet potrebných iterácií simulácie jednotlivých typov snímačov.

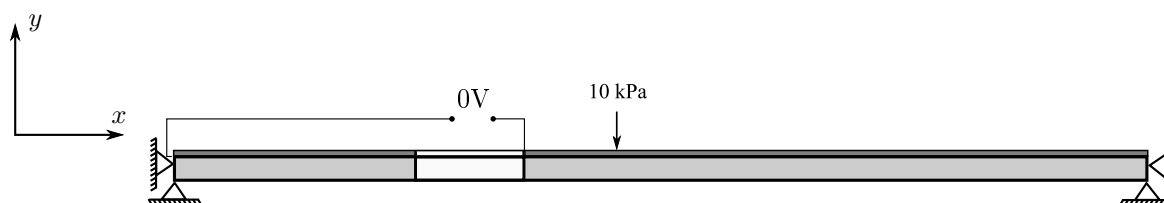
Membrána	$R1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R2$ [ $\mu\text{m}$ ]	$dh$ [ $\mu\text{m}$ ]	Počet iterácií [-]
Kruh	0	240	5	46
Prstenec	60	240	5	34

Tab. 8: Iterácie výpočtu

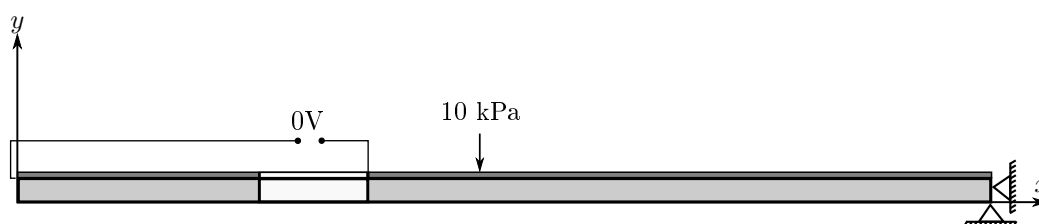
Šírka elektródy bola zvolená dostatočne malá. Elektródy boli dve (Obr. 12). Prvá bola permanentne po celej ploche snímača na spodnej strane AlGa<sub>N</sub> vrstvy, teda na ploche spájajúcej AlGa<sub>N</sub> s Ga<sub>N</sub>om, zatiaľ čo druhá mala premenlivú pozíciu na hornej strane AlGa<sub>N</sub> vrstvy. Na Obr. 12 je znázornená ako vrchná čiara plochy A10. Táto mala šírku  $dh$ . Na meranie náboja sa na oboch elektródach predpísalo počiatočné napätie 0V a na snímač sa aplikoval tlak 10kPa v zápornom smere osi  $y$ .



Obr. 12: Detail elektródy



Obr. 13: Okrajové podmienky pre meranie prstencového snímača



Obr. 14: Okrajové podmienky pre meranie kruhového snímača

## 4.5 Simulácia

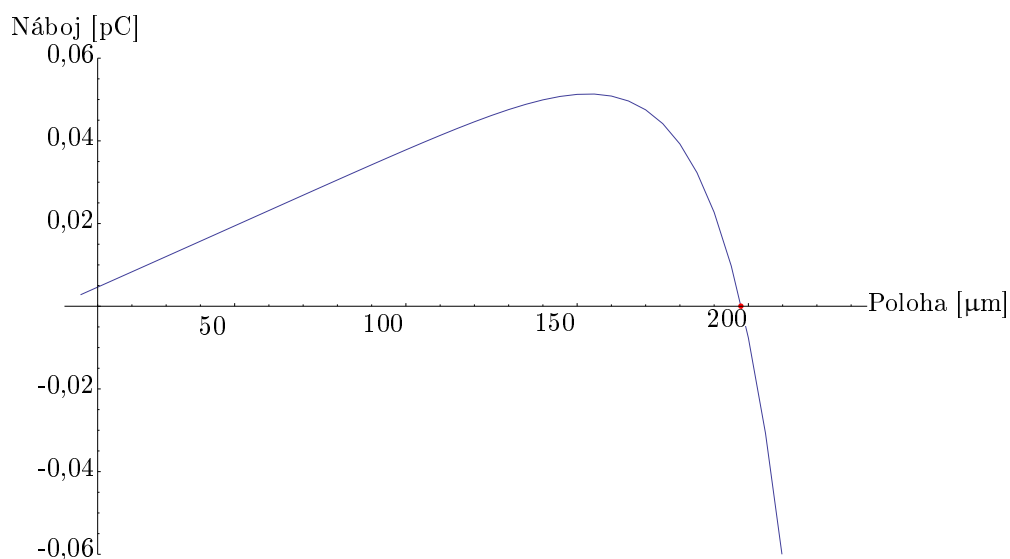
Z dôvodu zjednodušenej geometrie bolo postačujúce na simuláciu použiť 2D elementy. Pre náš prípad sme použili 8 uzlové PLANE183 a PLANE223. PLANE183 sme používali pri zadávaní počiatočného stavu a na simuláciu GaN plochy snímača, PLANE223 sme využili pre jeho možnosť počítať piezoelektrické úlohy na piezoelektrickú AlGaIn vrstvu.

## 4.6 Dosiahnuté výsledky

Po simulácií sme vedeli pomocou softvéru Mathematica zobraziť grafy závislosti medzi polohou elektródy a indukovaným elektrickým nábojom, ktoré sú zobrazené v Obr. 15 a v Obr. 16. Zvýraznené body znázorňujú body, na ktorých sa na elektróde indukovaný náboj vyruší. Polohy týchto bodov sú uvedené v Tab. 9 a v Tab. 10. Toto vyrušovanie sa deje z dôvodu, že sa priehyb membrány mení z konkávneho na konvexný, čo zapríčiňuje, že záporný indukovaný náboj z konkávnej časti sa rovná kladnému náboju indukovanému na konvexnej časti, a teda ich súčet je nulový.

Membrána	1. Kritický bod
Kruh	197,7976 $\mu\text{m}$

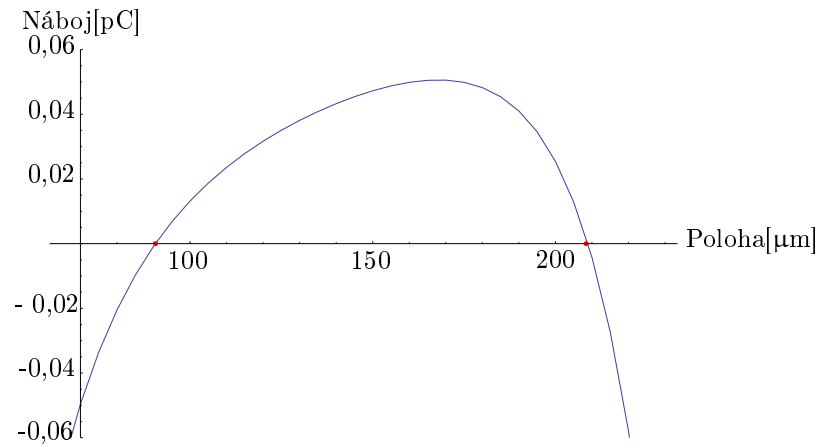
Tab. 9: Kritické body kruhovej membrány



Obr. 15: Graf závislosti polohy elektródy a náboja pre kruhový snímač

Membrána	1. Kritický bod	2. Kritický bod
Kruh	90,6145 $\mu\text{m}$	208,36 $\mu\text{m}$

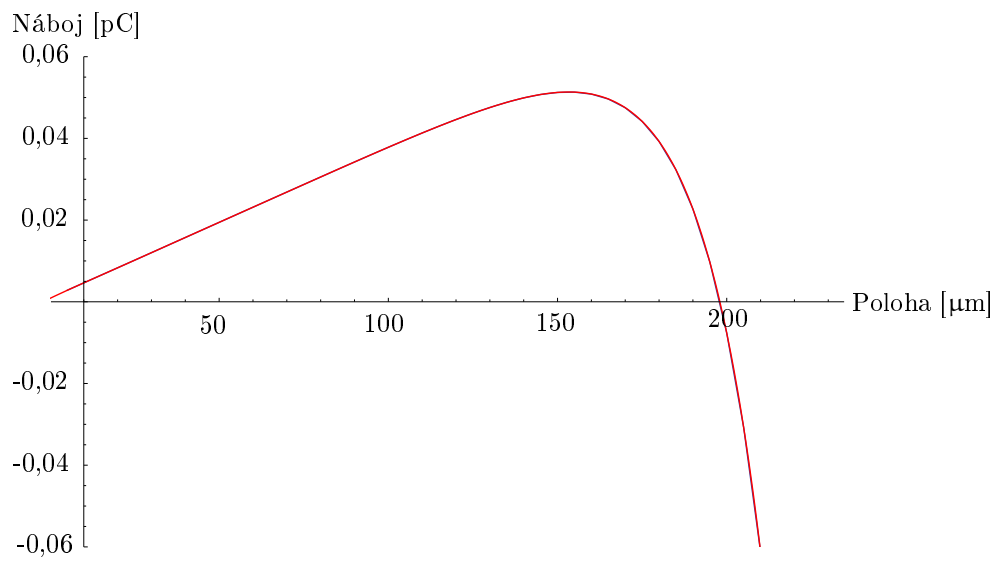
Tab. 10: Kritické body prstencovej membrány



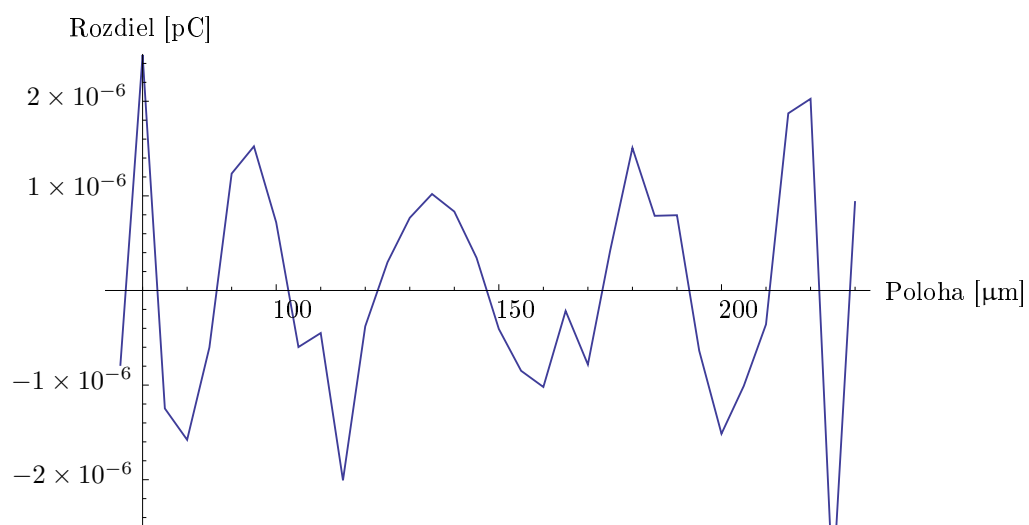
Obr. 16: Graf závislosti polohy elektródy a náboja pre prstencový snímač

Hodnoty z Tab. 9 a Tab. 10 udávajú hranice pre elektródy. Mimo týchto hraníc, teda v oblastiach so záporne indukovaným nábojom, nevieme presne určiť hodnoty náboja a kompatibilitu meraní s reálnymi hodnotami. To je spôsobené použitými okrajovými podmienkami. Model predpokladá voľtknutie v smere  $x$  na oboch koncoch, čo ale presne nezodpovedá realite, keďže som sa obmedzil iba na model obdĺžnika s dĺžkou strany  $x$  a výškou  $y$ . Simulácia nám ukázala miesta s najväčším indukovaným nábojom pre kruhový aj prstencový snímač. Na to, aby použitá elektróda indukovala čo najväčší náboj, je potrebné jej uloženie v oblasti mimo kritického bodu pre kruhový snímač a v oblasti medzi kritickými bodmi pre prstencovú membránu. Je nutné, aby žiadna časť elektródy neprechádzala kritickým bodom, kde by sa už prejavila časť s opačným nábojom a celkový indukovaný náboj by už nebol maximálny.

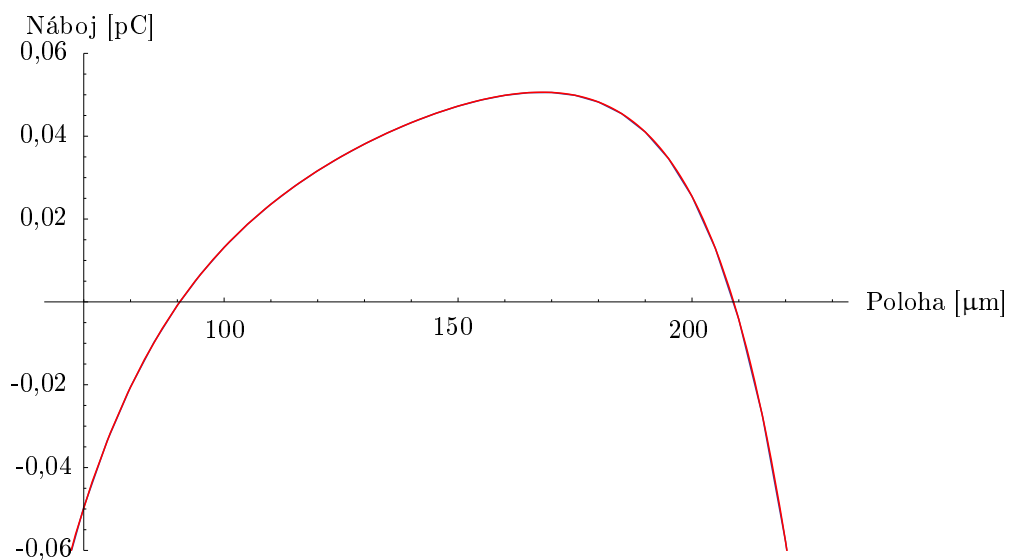
Ďalšia práca spočívala vo vytvorení programu, ktorý na základe simulovaných dát vie vypočítať presnú polohu ľubovoľne veľkej elektródy a veľkosť indukovaného náboja na nej. Ako prvé sme pomocou lineárnej regresie nameraných dát našli funkciu, ktorá najlepšie popisuje závislosť náboja od polohy. Samozrejmosťou bolo zmeranie chyby regresie a teda správnosť nášho odhadu funkcie. Priemerná odchýlka odhadnutej funkcie od pôvodných dát získaných simuláciou kruhového snímača je  $-1,08524 \times 10^{-14}$ , pri prstencovom snímači je táto odchýlka rovná  $-3,28983 \times 10^{-13}$ . Až po zmeraní chyby a potvrdení správnosti modelu sme mohli naše odhadnuté funkcie použiť na určovanie presnej polohy elektródy pre jednotlivé tvary snímača. Na Obr. 17 a Obr. 19 sú znázornené pôvodné dáta spolu s odhadnutou funkciou. a Obr. 18 a Obr. 20 zobrazujú chybové funkcie pre obe varianty snímača. Chybovú funkciu sme získali tak, že sme od simulovaných hodnôt odpočítali regresiou odhadnuté dáta a tak získali chybu, pri ktorej sa dopúšťame pri počítaní s odhadnutými dátami. Vidíme, že pri oboch prípadoch je táto chyba blízka 0.



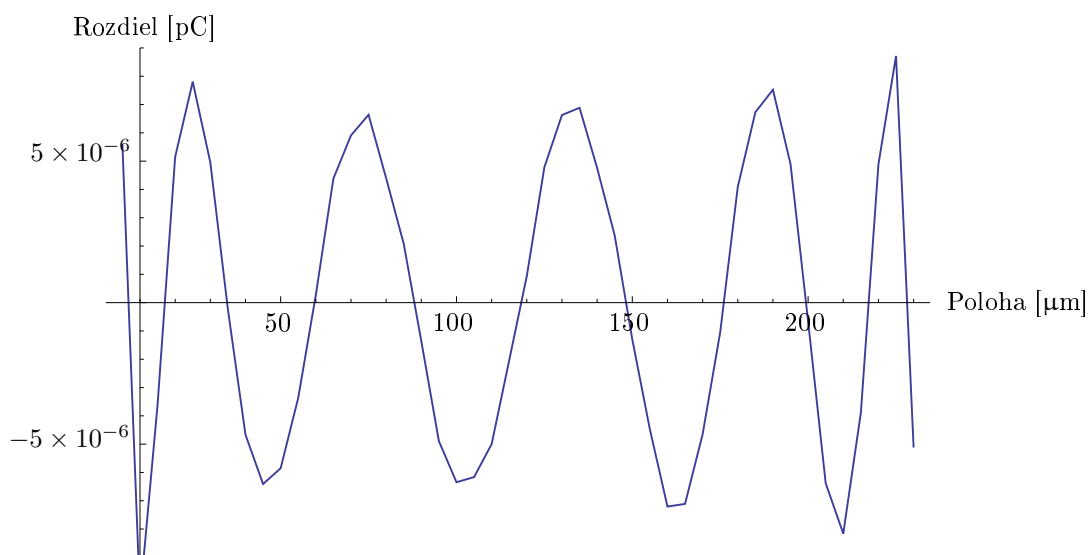
Obr. 17: Simulované + odhadnuté dáta pre prstencový snímač



Obr. 18: Chybová funkcia snímača prstencového tvaru



Obr. 19: Simulované + odhadnuté dáta pre kruhový snímač

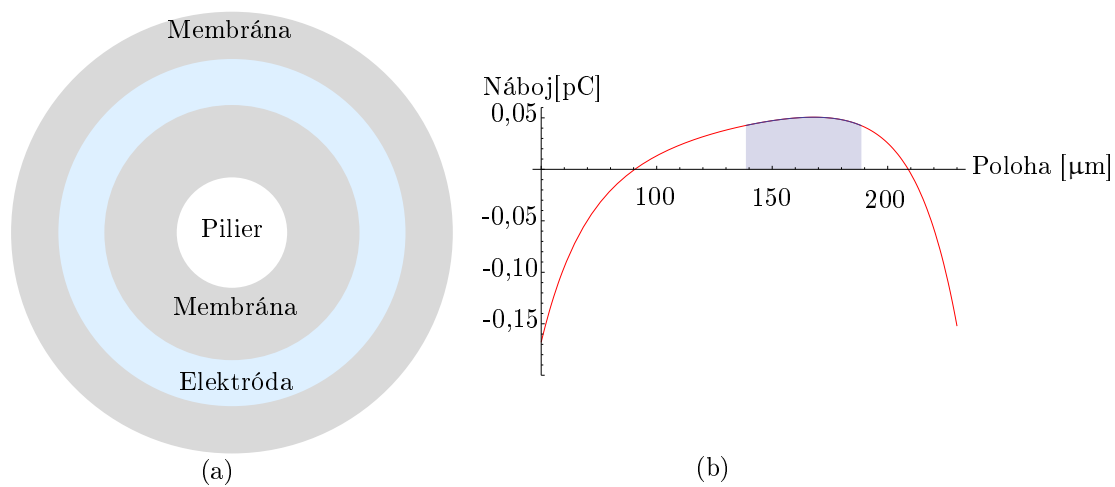


Obr. 20: Chybová funkcia snímača kruhového tvaru

Na základe týchto poznatkov sme mohli vytvoriť program na určenie presnej polohy elektródy pre jej danú veľkosť. Program bol vytvorený v softvéri Mathematica z dôvodu jednoduchšej implementácie a možnosti grafických výstupov. Boli vytvorené dve verzie programu. Jedna počítala presnú polohu pre prstencový tvar snímača, druhá pre kruhový. Oba programy sú rozšírené o možnosť vykreslenia grafu závislosti polohy elektródy a polohy náboja a približný náčrt samotného snímača. Na Obr. 21 vidíme výstup programu pre prstencovú membránu a na Obr. 22 pre kruhovú. V Prílohe v časti A sú uvedené optimálne polohy elektródy spolu s indukovaným nábojom pre obe geometrie snímača vypočítané pomocou vytvoreného programu.

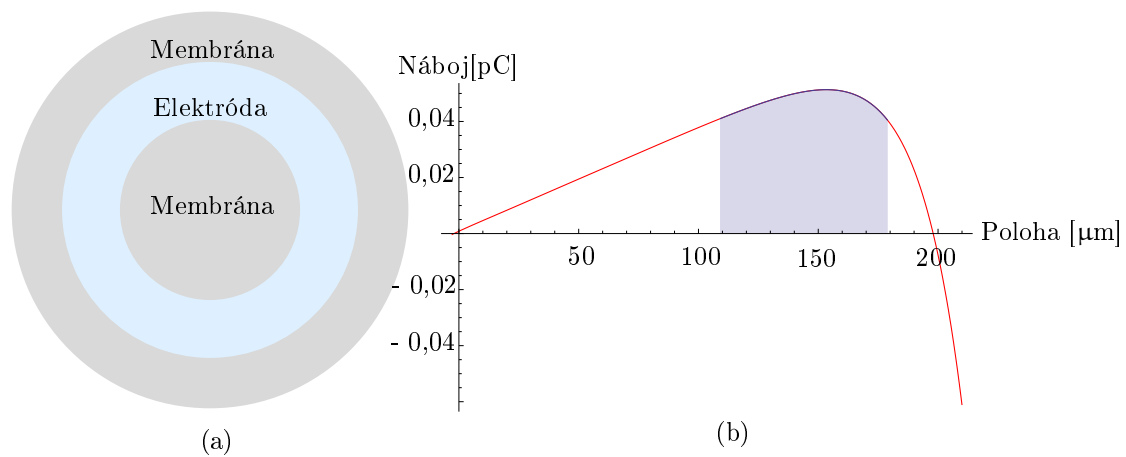


Šírka elektródy: 50  $\mu\text{m}$   
 Ľavý koniec: 138,615  $\mu\text{m}$   
 Pravý koniec: 188,615  $\mu\text{m}$   
 Indukovaný náboj: 2,39539 pC



Obr. 21: Výstup programu pre prstencovú membránu

Šírka elektródy: 70  $\mu\text{m}$   
 Ľavý koniec: 109  $\mu\text{m}$   
 Pravý koniec: 179  $\mu\text{m}$   
 Indukovaný náboj: 3,33369 pC



Obr. 22: Výstup programu pre kruhovú membránu

## 5 Záver

MEMS alebo mikroelektromechanické systémy tvoria základ pre výrobnú technológiu využívajú pri zostavovaní mikroskopických integrovaných zariadení alebo systémov, ktoré kombinujú mechanické a elektronické komponenty. Práca sa zaoberá teoretickými základmi piezoelektrického javu, MEMS systémov a MKP analýzou piezoelektrického tlakového MEMS snímača pomocou softvéru ANSYS. Snímač bol vyhotovený v dvoch prevedeniach. Kruhový a prstencový. Prvá kapitola poskytla teoretický základ pre pochopenie piezoelektrického javu. V druhej kapitole sme sa bližšie zamerali na komponenty tvoriace MEMS systémy, ich výrobu a materiály, ktoré sa pri výrobe a aplikáciách využívajú. Tretiu kapitolu sme venovali MKP simuláciám oboch tvarov snímačov v programe ANSYS, pri ktorej bola úspešne nájdená optimálna poloha elektródy pre jednotlivé tvary snímača. Následne bol pomocou softvéru Mathematica vytvorený program, ktorý umožňuje jednoduché počítanie optimálnej polohy elektródy pre jej rôznu šírku. Cieľ mojej práce, teda analýza optimálnej polohy elektródy pre jej rôznu šírku sa nám podarilo splniť. V oboch prípadoch geometrie snímača sa nám podarilo dosiahnuť požadované výsledky a na základe simulovaných dát sa úspešne podarilo vytvoriť komplexný program pre optimalizáciu riešenia danej úlohy, ktorý dopomôže k optimalizácii výrobného procesu MEMS systémov využívajúcich piezoelektrické tlakové snímače uvedeného typu.

## Literatúra

- [1] ANSYS, Inc. *ANSYS 13.0 Help System*, 2011.
- [2] Bin Liu. *Transducers for Sound and Vibration*. PhD thesis, Jún 2001.
- [3] N. P. Mahalik. *Mems*. (ISBN-10: 0-07-063445-9), 2007.
- [4] PRIME Faraday Partnership. *An introduction to mems*. (ISBN 1-84402-020-7), 2002.
- [5] Inc. Piezo Systems. *History of piezoelectricity [ONLINE]*, Máj 2013. <http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/fet-field-effect-transistor/hemt-phemt-transistor.php>.
- [6] A. Preumont. *Mechatronics dynamics of electromechanical and piezoelectric systems*. (ISBN-10 1-4020-4695-2):95–100, 2006.
- [7] Andrew J. Freming S.O. Reza Moheimani. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. (ISBN-1430-9491):14–22, 2006.

## Príloha A

### Tabuľky simulovaných hodnôt

Šírka elektródy [ $\mu\text{m}$ ]	Ľavý koniec [ $\mu\text{m}$ ]	Pravý koniec [ $\mu\text{m}$ ]	Indukovaný náboj [pC]
5	165,615	170,615	0,252956
10	162,615	172,615	0,505087
15	159,615	174,615	0,755535
20	157,615	177,615	1,00352
25	154,615	179,615	1,24826
30	151,615	181,615	1,48891
35	148,615	183,615	1,72468
40	144,615	184,615	1,95488
45	141,615	186,615	2,17875
50	138,615	188,615	2,39539
55	134,615	189,615	2,60394
60	131,615	191,615	2,80415
65	128,615	193,615	2,99451
70	124,615	194,615	3,17472
75	121,615	196,615	3,34339
80	117,615	197,615	3,50001
85	114,615	199,615	3,64283
90	110,615	200,615	3,7716
95	106,615	201,615	3,88379
100	103,615	203,615	3,97905
105	99,6145	204,615	4,05461
110	96,6145	206,615	4,10919
115	92,6145	207,615	4,14009

Tab. 11: Veľkosť elektródy, optimálna poloha a indukovaný náboj pre prstencový snímač

Šírka elektródy [μm]	Ľavý koniec [μm]	Pravý koniec [μm]	Indukovaný náboj [pC]
5	151	156	0,256668
10	148	158	0,512708
15	145	160	0,767476
20	142	162	1,02037
25	139	164	1,27083
30	136	166	1,51831
35	133	168	1,76226
40	130	170	2,00217
45	127	172	2,2375
50	123	173	2,46806
55	120	175	2,69318
60	116	176	2,91284
65	112	177	3,12638
70	109	179	3,33369
75	105	180	3,53467
80	101	181	3,72889
85	97	182	3,91617
90	93	183	4,09637
95	89	184	4,26932
100	85	185	4,4349
105	81	186	4,59298
110	77	187	4,74342
115	73	188	4,8861
120	68	188	5,02129
125	64	189	5,14869
130	60	190	5,26806
135	56	191	5,37928
140	51	191	5,483
145	47	192	5,57852
150	43	193	5,66559

Tab. 12: Veľkosť elektródy, optimálna poloha a indukovaný náboj pre kruhový snímač