



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND  
ELECTRONIC TECHNOLOGY

# Snímač tlaku vytvořený strukturou 3D

## Pressure sensor made 3D structure

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

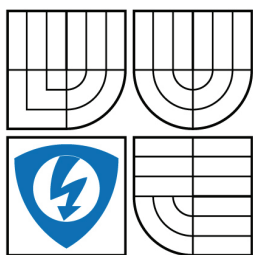
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Martin Hanus

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Petr Kosina

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Martin Hanus

**ID:** 73033

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Snímač tlaku vytvořený strukturou 3D**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Ze získaných poznatků ze semestrálního projektu vytvořte funkční prototyp snímače tlaku. Snímač realizujte do 3D struktury na keramice nízkých teplot (LTCC). Struktura bude obsahovat dva typy snímačů. Testujte vliv tvaru a rozmístění elektrod na citlivost snímače. V závěru práce zhodnoťte kvalitu snímače a jeho možné uplatnění. Práci doplňte o vyhodnocovací obvody.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

<http://automatizace.hw.cz>

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 3.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Kosina

**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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma **Snímač tlaku vytvořený strukturou 3D** vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 3. června 2009..... podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Petru Kosinovi** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 3. června 2009 ..... podpis autora

**Abstrakt:**

Tato práce se zabývá problematikou snímače tlaku vytvořeného pomocí struktury 3D. Snímač tlaku převádí tlak na lépe měřitelnou veličinu, která se dále zpracovává. Snímání tlaku se provádí nejčastěji kapacitně, tenzometricky a opticky. Struktury 3D lze konstruovat za pomoci technologie LTCC, kterou lze oproti standardní korundové keramice laminovat do vícevrstevných struktur. Pasivní obvodové součástky lze na jednotlivé vrstvy keramiky nanášet pomocí tenkovrstvé nebo tlustovrstvé technologie. Praktická část práce se zabývá několika způsoby konstrukce tlakového snímače. Jedná se především o kapacitní tenzometrický a optický senzor a případné problémy s výrobou jednotlivých senzorů především problémy s laminací, dutinami nebo výpalem.

**Klíčové slova:**

3D struktura, tlakový snímač, keramika, LTCC

**Abstract:**

This thesis deals with the points at issue of a 3D structure pressure sensor. The pressure sensor converts pressure into another physical quantity which is easier measure and which is processed subsequently. Usually ways of pressure sensing is for example capacitive, strain-gauge and optical. The 3D structures are constructed through the use of a LTCC technology, which can be laminated to create multi-layer structures, compared to standard high-temperature ceramics. Passive circuit components can be applied onto particular ceramic layers using either thin-layer or thick-layer technology. Practice part of thesis deals with several ways of construction a pressure sensor. First of all capacitive, strain-gauge and optical sensor and possible problems with construction individual sensors above all problems with lamination, cavity or burning

**Keyword:**

3D structure, pressure sensor, ceramic, LTCC

HANUS, M. *Snímač tlaku vytvořený strukturou 3D*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina.

# Obsah

Úvod.....	9
1 Technologie LTCC.....	10
1.1 Parametry keramiky LTCC .....	10
2 Výrobní proces .....	11
2.1 Výroba keramické folie .....	11
2.2 Výroba děr a propojů .....	11
2.3 Vytváření vrstev .....	11
2.4 Laminování .....	15
2.5 Výpal .....	16
3 Snímače tlaku .....	18
4 Praktická část.....	20
5 Vlastní návrh snímače .....	22
5.1 Snímač tenzometricko-kapacitní .....	22
5.1 Snímač kapacitní upravený.....	24
5.2 Nahrazení keramického deformačního členu kovovou fólií.....	25
5.3 Použití optického vlákna v keramice .....	26
5.4 Použití grafitu v dutině .....	27
5.5 Snímač kapacitní s různým počtem vrstev deformačního členu .....	28
5.6 Snímač opticko-kapacitní .....	41
Závěr.....	47
Použitá literatura .....	48

## Seznam obrázků:

Obrázek 1.1 3D struktura vytvořena pomocí LTCC .....	10
Obrázek 2.1 Schéma výrobního procesu [1] .....	11
Obrázek 2.2 Základní princip vakuového napařování.....	14
Obrázek 2.3 Základní princip katodového napařování .....	15
Obrázek 2.4 Výpalový profil technologie LTCC .....	17
Obrázek 3.1 Nosník s tenzometry se znázorněním silového působení.....	18
Obrázek 3.2 Kapacitní čidlo .....	19
Obrázek 4.1 Destička s výřezy .....	20
Obrázek 4.2 Struktura před laminací.....	20
Obrázek 4.3 Řez destičkou pod mikroskopem .....	21
Obrázek 4.4 Defekt 3D struktury pod mikroskopem .....	21
Obrázek 4.5 Defekt 3D struktury pod mikroskopem .....	21
Obrázek 5.1 Návrh čidla s páskovým deformačním členem.....	22
Obrázek 5.2 Realizované čidlo s páskovým deformačním členem .....	22
Obrázek 5.3 Návrh čidla s křížovým deformačním členem .....	23
Obrázek 5.4 Realizované čidlo s křížovým deformačním členem .....	23
Obrázek 5.5 Návrh čidla s upraveným křížovým deformačním členem .....	24
Obrázek 5.6 Kapacitní snímač s menšími výřezy.....	24
Obrázek 5.7 Ocelová fólie jako deformační člen .....	25
Obrázek 5.8 Měděná fólie jako deformační člen.....	25
Obrázek 5.9 optické vlákno prosvícené.....	26
Obrázek 5.10 optické vlákno pohled ze strany.....	26
Obrázek 5.11 Čidlo s grafitem v dutině - pohled shora.....	27
Obrázek 5.12 Čidlo s grafitem v dutině - pohled ze spodu .....	27
Obrázek 5.13 Kapacitní snímač bez výřezu v horní vrstvě .....	28
Obrázek 5.14 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva.....	31
Obrázek 5.15 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva.....	32
Obrázek 5.16 Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva .....	32
Obrázek 5.18 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy .....	35
Obrázek 5.19 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy .....	35
Obrázek 5.20 Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy .....	36
Obrázek 5.22 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy.....	39
Obrázek 5.23 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy.....	40
Obrázek 5.24 Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy.....	40
Obrázek 5.26 Návrh opticko-kapacitního čidla.....	41
Obrázek 5.27 Realizovaný snímač s opticko-kapacitním převodem.....	41
Obrázek 5.28 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel .....	45
Obrázek 5.29 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel ...	45
Obrázek 5.30 Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel ...	46

## Seznam tabulek:

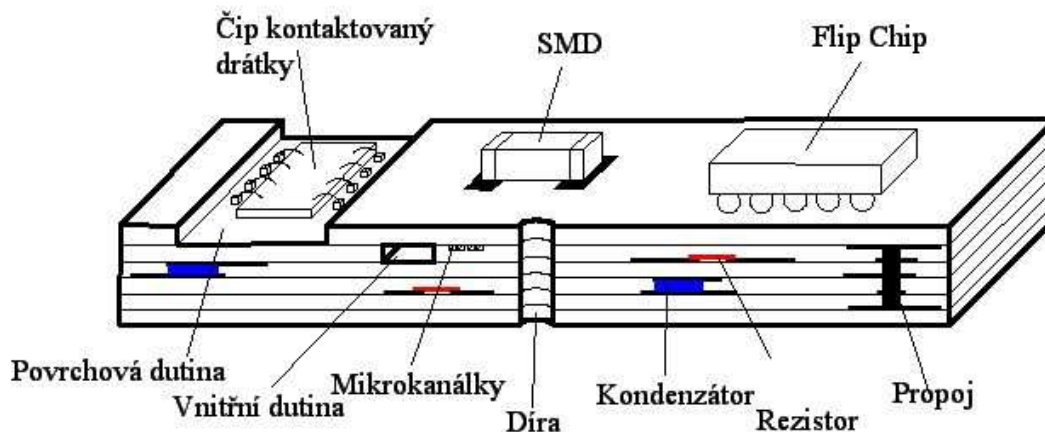
Tabulka 1-1 Porovnání 96% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> a LTCC [1] .....	10
Tabulka 2-1 Porovnání parametrů tenkých a tlustých vrstev[1] .....	15
Tabulka 5-1 Působící síla 0N pro snímač s jednou vrstvou .....	29
Tabulka 5-2 Působící síla 0,1N pro snímač s jednou vrstvou .....	29
Tabulka 5-3 Působící síla 0,2N pro snímač s jednou vrstvou .....	30
Tabulka 5-4 Působící síla 0,3N pro snímač s jednou vrstvou .....	30
Tabulka 5-5 Působící síla 0,4N pro snímač s jednou vrstvou .....	31
Tabulka 5-6 Působící síla 0,5 pro snímač s dvěma vrstvami .....	33
Tabulka 5-7 Působící síla 1,0N pro snímač s dvěma vrstvami .....	33
Tabulka 5-8 Působící síla 1,5N pro snímač s dvěma vrstvami .....	34
Tabulka 5-9 Působící síla 2,0 N pro snímač s dvěma vrstvami .....	34
Tabulka 5-10 Působící síla 0N pro snímač s jednou vrstvou .....	36
Tabulka 5-11 Působící síla 0,1N pro snímač s jednou vrstvou .....	37
Tabulka 5-12 Působící síla 0,2N pro snímač s jednou vrstvou .....	37
Tabulka 5-13 Působící síla 0,4N pro snímač s jednou vrstvou .....	38
Tabulka 5-14 Působící síla 0,8N pro snímač s jednou vrstvou .....	38
Tabulka 5-15 Působící síla 1,4N pro snímač s jednou vrstvou .....	39
Tabulka 5-16 Působící síla 0N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	42
Tabulka 5-17 Působící síla 0,5N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	42
Tabulka 5-18 Působící síla 1N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	43
Tabulka 5-19 Působící síla 1,5N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	43
Tabulka 5-20 Působící síla 2N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	44
Tabulka 5-21 Působící síla 3N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami.....	44

## Úvod

Tato práce se zabývá využitím 3D struktur při konstrukci snímače tlaku. Pod pojmem 3D struktury rozumíme struktury složené z více nosných vrstev, kde lze vytvořit dutiny nebo jiné útvary (kanálky). Keramika nízkých teplot LTCC se využívá právě proto, že umožňuje vytvořit 3D struktury. Na keramiku LTCC je taky možné nanést pasivní obvodové prvky pomocí tlustovrstvé nebo tenkovrstvé technologie. Díky planárním technologiím lze dosáhnout velmi dobré integrace součástek na jednotku plochy, pak je možno zkonstruovat snímač i vyhodnocovací obvod v jedné 3D struktuře. Tyto vlastnosti umožňují využití keramiky LTCC v sensorové technice. Sensorová technika se zabývá tím, že převádí zkoumanou veličinu (v našem případě tlak) na jinou lépe měřitelnou jednotku (nejčastěji napětí). Měřené veličina (tlak) se převádí tak, že mění obvod (např. roztažení tenzometru, prohnutí deformačního členu), tím se deformační projevů tlaku projeví jako změny odporu nebo kapacity. Snímač tlaku, kterým se práce zabývá, je založen na kapacitním tenzometrickém a optickém snímání. Kapacitní senzor je vlastně deskový kondenzátor s pohyblivou elektrodou. Elektrody jsou vytvořeny tlustovrstvou technologií. Keramika LTCC je využita k vytvoření dutiny a deformačního členu.

# 1 Technologie LTCC

Technologie LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic), keramika nízkých teplot. Jedna vrstva keramiky se nazývá tape. Keramiky od různých výrobců se mohou lišit např. tloušťkou tape-u, permitivitou a smrštivostí při výpalu. Pomocí LTCC keramiky lze tvořit různé struktury, jako například kanálky nebo dutiny. Do dutiny umístít lze čip, kanálek lze použít na snímač průtoku nebo lze pomocí keramiky vytvořit deformační člen. Díky těmto vlastnostem se začíná keramika LTCC uplatňovat senzorové technice.[6]



Obrázek 1.1 3D struktura vytvořena pomocí LTCC

## 1.1 Parametry keramiky LTCC

Při porovnání s běžnou korundovou keramikou má keramika LTCC výhody i nevýhody. Základní rozdíl je možnost tvořit vícevrstvé struktury a rozdílná teplota výpalu. Další rozdíly jsou uvedeny v tabulce 1-1.

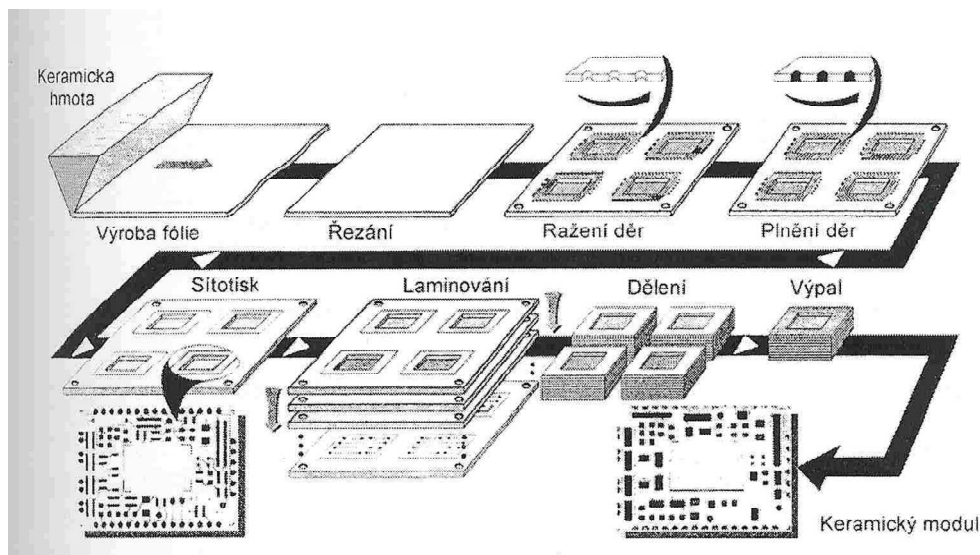
Tabulka 1-1 Porovnání 96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a LTCC [1]

Parametr	96% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LTCC (Dupond 951)
Tepelná vodivost [W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	35	3
Součinitel teplotní roztažnosti [ppm.K <sup>-1</sup> ]	6,4	5,8
Relativní permitivita [-]	9	7,5
Elektrická pevnost [kV.mm <sup>-1</sup> ]	8	>40

Z tabulky vyplývá, že keramika LTCC má lepší elektrickou pevnost. A korundová keramika má lepší tepelnou vodivost. Nejnovější druhy LTCC keramiky mají taky velmi malé smrštění v ose X a Y při výpalu (asi 0,2%), v ose Z je smrštění 15%. [1]

## 2 Výrobní proces

Výrobní proces 3D struktury je poměrně variabilní a závisí na složitosti motivu, počtu vrstev a výrobním zařízením. Základní schéma výrobního procesu znázorněn na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Schéma výrobního procesu [1]

### 2.1 Výroba keramické fólie

Základ keramické fólie tvoří homogenní tvárná směs „slip“. Slip se nanáší na podložku, podložka je většinou polyesterová fólie. Slip nanesený na podložce vytváří keramickou fólii (tape). Tape se nechá projít vysoušecím procesem. Další operací zařízení upraví tloušťku keramické směsi na hodnotu v rozmezí  $50\mu\text{m}$  -  $200\mu\text{m}$ . Tape se přenesne na ocelovou podložku a rozřeže se na díly. V dalším kroku se tape vystaví na 30min teplotě  $120^{\circ}\text{C}$  nebo se vloží na 24 hodin do vysoušecího boxu s nitrogenovou koncentrací. Konečné rozměry jsou vyraženy razidlem, ale lze je i vyřezat laserem. [1]

### 2.2 Výroba děr a propojů

Díry se vyrábí nejčastěji třemi základními způsoby

- Laser
- Ražení
- Obrábění na CNC

Proměnné parametry u děr jsou

- Velikost
- Tvar
- Zkosení hran

### 2.3 Vytváření vrstev

Vrstvy na tape-ch mohou být vodivé, odporové nebo dielektrické a nanesou se v požadovaném motivu.

## **Tlusté vrstvy**

Nanášejí se aditivním způsobem na keramický substrát, mají amorfni strukturu, jejich tloušťka je řádově větší než 1 $\mu$ m a výpal probíhá za teploty kolem 850°C u vodivých a odporových past a kolem 550°C u dielektrických past.

### **Výpočet rozměrů vrstev**

Pro zjednodušení návrhu se zavedl pojem odpor na čtverec pro vodivé a odporové vrstvy. [1]

### **Výpočet odporu**

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} = R_v \cdot \frac{l}{w} = R_v \cdot A \quad (2.1)$$

R	hodnota odporu rezistoru [ $\Omega$ ]
$\rho$	měrný odpor [ $\Omega \cdot m$ ]
l	délka odporu [m]
s	plocha průřezu odporu [ $m^2$ ]
w	šířka odporu [m]
t	tloušťka odporu (vrstvy) [m]
$R_v$	vrstvový odpor [ $\Omega/\square$ ]
A	počet čtverců (poměr délka/šířka) [-]

Pro výpočet vrstevové kapacity byl použit vzoreček s definovanou měrnou hodnotou a konstantní tloušťkou dielektrika. [1]

### **Výpočet kapacity**

$$C = 0,0885 \cdot \epsilon_d \cdot \frac{a \cdot b}{t_d} = C_0 \cdot a \cdot b = C_0 \cdot S_c \quad (2.2)$$

$\epsilon_d$	permitivita dielektrika [-]
$t_d$	tloušťka dielektrika [cm]
a,b	rozměr stran kondenzátoru [cm]
$C_0$	vrstvová kapacita [ $pF \cdot cm^{-2}$ ]
$S_c$	plocha kondenzátoru [ $cm^{-2}$ ]

### **Pasty pro výrobu tlustých vrstev**

Základní parametry past jsou viskozita, velikost zrn a funkční složce. Podle toho se mění jednotlivé složky a poměr složek pasty. Každá pasta má obvykle tři složky.

### **Funkční složka**

Podle funkční složky se určí, zda se bude jednat o vrstvu vodivou, odporovou nebo dielektrickou. Pasty určené pro vodiče obsahují zrna drahých kovů jako Ag, Au, Pt a další. Pro dielektrika se používají dielektrické a skelné frity (jemné prášky) a pro odporové vrstvy se používají oxidy drahých kovů  $RuO_2$ ,  $IrO_2$  a nověji lze použít uhlík. Velikost částic je řádově v  $\mu$ m.

**Tavivová složka**

Tato složka slouží k vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Základní materiál je skelná fritta ze skel, které mají nízkou teplotu tavení (600°C). Nověji se používá oxidová vazba vytvořená přidavným kovem. Při výpalu musí dojít k měknutí, ale ne k roztavení, aby mohla vzniknout nosná matrice.

**Pojivová složka**

Tato složka zajišťuje tiskové vlastnosti pasty jako je viskozita a adheze. Tvoří ji organické látky jako terpineol, butyldiglykolacetát a další. Při výpalu se tato složka odpaří a na konečné funkci nebude mít podíl.

**Sítotisk**

Jedná se o nejrozšířenější metodu nanášení tlustých vrstev. U sítotisku záleží na několika parametrech. Materiál síta, počet ok na cm, velikost ok., odskok síta (vzdálenost síta od podložky), rychlost a sklon těrky.

Postup: Těrka působí na síto silou pod určitým úhlem, při pohybu před sebou tlačí pastu. Když se působí na pastu silou, mění svou viskozitu, což jí umožňuje dobře protéct skrz motiv síta, poté co pasta ulpí na podložce, se její viskozita mění zpět na původní hodnotu. [1]

**Šablonový tisk**

Je to obdoba sítotisku. Hlavní rozdíl je, že šablona je tuhá planžeta, nejčastěji z chromniklové nerezové oceli (X5CrNi18-10) nebo fosforový bronz (CuSn6) a leží přímo na substrátu (bez odskoku). Odtrhnutí šablony od podložky je provedeno mechanickým pohybem. Rychlost oddělení planžety od substrátu musí být dostatečná, aby se dobře přenesl motiv na podložku. [1]

**Výhoda šablony oproti sítu:**

- vyšší životnost planžet
- lepší soutisk
- větší rozlišení

**Výhody síta oproti šabloně:**

- Nižší náklady na výrobu síta
- Tisk větších ploch
- Levné odstranění a znovuvytvoření motivu
- Síto lépe kompenzuje nerovnosti povrchu

**Tenké vrstvy**

Tenké vrstvy mohou mít amorfni, polykrystalickou nebo monokrystalickou. Tyto vrstvy se řízeně nanášejí na podložku a to v uzavřeném vakuovém prostoru. V elektronice se nejčastěji používá napařování a naprašování. Tloušťka vrstev je od desetin μm po jednotky μm. Tenké vrstvy mají taky lepší vlastnosti než tlusté vrstvy, což je kompenzováno vyšší cenou a náročnější metodou nanášení. [1], [2]

### Vakuové napařování

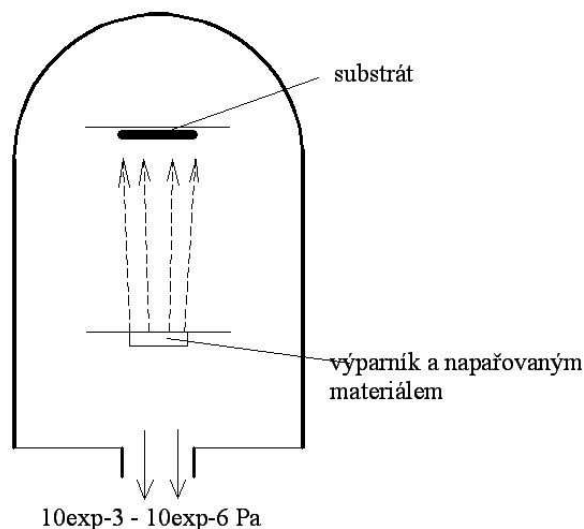
Princip spočívá v ohřevu nanášeného materiálu na příslušnou teplotu, tím se zvýší kinetická energie částic v povrchové vrstvě, díky tomu se začnou z povrchu uvolňovat částice (atomy popřípadě molekuly), ty vytvoří mrak, tím vzniká rovnovážný tlak par v ohraničeném prostoru. Tento jev se nazývá tenze nasycených par. Tím, že je substrát, na který chceme nanést chladnější než pára, částice na něm začnou kondenzovat. Aby se částice pohybovali přímočaře, musí být v systému dostatečné vakuum ( $10^{-3} - 10^{-5}$  Pa). Čím větší je vakuum tím, delší je volná dráha částic a ta musí být větší, než je vzdálenost výparníku, aby byla zajištěna dostatečná energie a rychlost částic před dopadem na substrát. [2]

#### **Způsoby odpařování materiálu:**

- Odporovým teplem
- Laserem
- Elektronovým svazkem

Odpařování teplem je nejčastější. Přímý ohřev, kde je výparník zároveň napařovaným materiálem, ohřev materiálu je způsoben průchodem proudu. Vhodný materiál je NiCr, Cr, Mo. Při nepřímém ohřevu, získává napařovaný materiál teplo z výparníku, ten může mít různý tvar jako lodička, kelímek nebo topná spirála atd. Metoda **Flash**, spočívá v tom, že se sype přesně dávkovaný materiál na rozžhavený element o vysoké tepelné kapacitě a napařovaný materiál se bleskově odpaří. Dále je možno odpařovat z více zdrojů při různých teplotách aby vznikla na substrátu vrstva s požadovaným složením.

Vzhledem k velkému počtu poruch ve vrstvě vytvořené vakuovým napařováním je nutné vrstvu žíhat. Žíhání zlepšuje vlastnosti vytvořené vrstvy. Probíhá za teploty kolem  $250^{\circ}\text{C}$  po dobu několika hodin. [2]

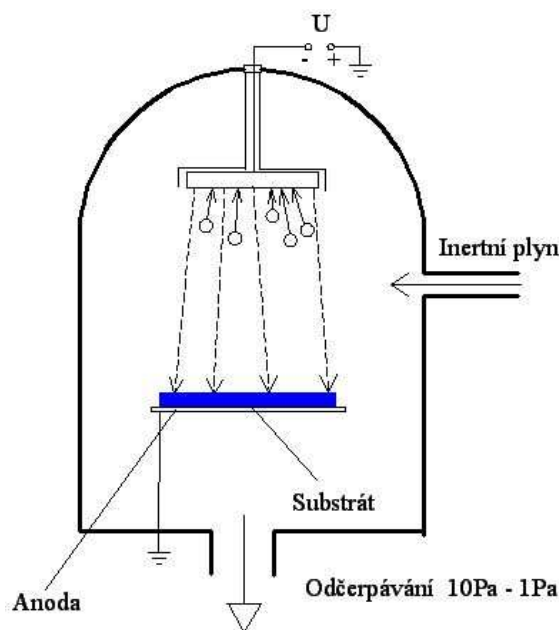


**Obrázek 2.2 Základní princip vakuového napařování**

### Katodové napařování

Napařovaný materiál je ve formě katody. V uzavřeném systému působí doutnavý výboj, v inertním plynu a sníženém tlaku na  $10^{-10}$  Pa. Doutnavý výboj tvoří u katody katodový spád. Kladné ionty inertního plynu jsou urychlovány směrem ke katodě a bombardují její povrch, tím vyrážejí částice napařovaného materiálu a ty se usazují na substrátu.

Množství nanášeného materiálu závisí na napětí, vzdálenosti mezi anodou a katodou, tlaku a na atomové hmotnosti napařovaného materiálu. [2]



Obrázek 2.3 Základní princip katodového naprašování

### Porovnání tenké a tlusté vrstvy

Tabulka 2-1 Porovnání parametrů tenkých a tlustých vrstev[1]

Parametr	Tenká vrstva	Tlustá vrstva
Rozlišení čary/mezery[ $\mu\text{m}$ ]	10(5)	100(50)
Vrstvový odpor vodičů[m $\Omega$ ]	<1	<30(5)
Řady rezistorů[ $\Omega$ ]	100-500	$10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$
TCR[ppm.K <sup>-1</sup> ]	<100(30)	100-400
Stabilita, 70°C, 1000h [%]	0,1	0,5
$P_{\text{ztrátový}}$ [W.cm <sup>2</sup> ]	0,2	1,5
Proudový šum[ $\mu\text{V/V}$ ]	0,05	0,3(100 $\Omega$ )-3(100k $\Omega$ )

Z tabulky je patrné, že tenké vrstvy jsou lepší, co se týká rozměrů, vodivosti vodičů, stability, šumu a vlivu teploty. Tlusté vrstvy mají výhodu ve velkém rozsahu odporů, snesou větší výkony a jejich výroba je levnější a jednodušší. Pokud tedy chceme přesné a stabilní hodnoty při nízkém výkonu volíme tenké vrstvy, pokud nám záleží víc na ceně než na přesnosti a potřebujeme velké rozpětí odporů nebo vyšší výkon volíme tlusté vrstvy.

## 2.4 Laminování

Po kontrole nanesených vrstev, děr a výřezů se fólie seřadí a srovnají v šabloně, pak jsou stlačeny na dobu přibližně 10min tlakem 2100N/cm<sup>2</sup> při 70°C. [1], [6]

Laminování může být:

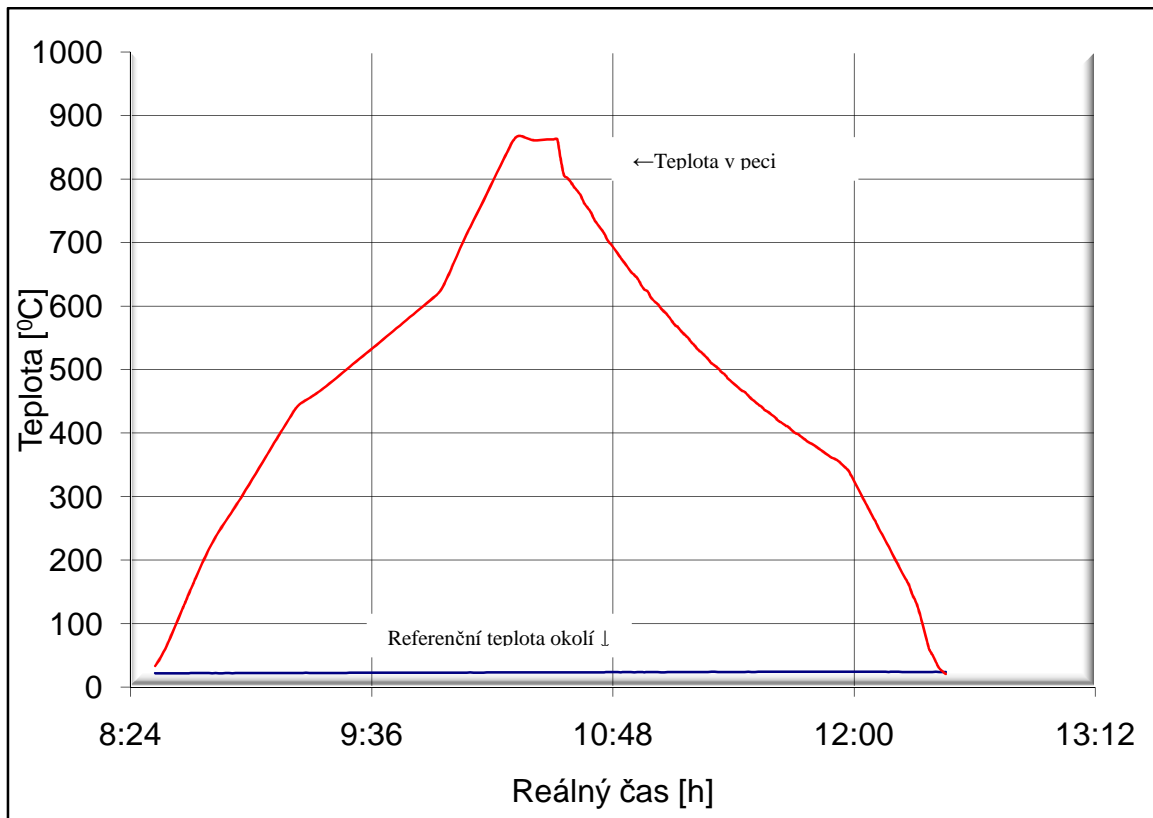
- **Isostatické**(tlak ve všech směrech) být vyplněná povrchová dutina speciálním materiálem, bez toho není na vrstvy na dně dutiny vyvíjen žádný tlak a při výpalu by mohli nastat defekty.
- **Uniaxiální** (tlak v jednom směru) se musí použít výplň dutiny, ale na druhou stranu dochází k zhoršení ostroty hran
- **Jednostupňové laminování** všechny tape-y jsou laminovány v jednom kroku
- **Vícetupňové laminování** spočívá v tom, že se laminují zvlášť vrstvy, které tvoří dno dutiny, dutinu a případně strop dutiny a pak se tyto bloky laminují dohromady

Defektům při laminaci lze zabránit pomocí:

- **Eliminace průhybu (propadání) při výpalu**  
Na strop dutiny se nanese tlustá vrstva s potřebným teplotním koeficientem roztažnosti, která nám při výpalu kompenzuje prohnutí keramiky.
- **Dočasná výplň**  
Lze použít olovnaté-křemičité frity, které vyplní dutinu. Po výpalu se olovnaté-křemičité sklo leptá. Nevýhoda je, že se může poškodit samotná keramika a taky se neodstraní veškeré sklo.
- **Prchavá látka**  
Grafitový prášek s vysokou viskozitou a organickým nosičem. Při výpalu se grafit vypeče, oproti předchozí metodě se nic neleptá, ale uhlík částečně zůstává v keramice.

## 2.5 Výpal

Každý výrobce keramického substrátu udává vypalovací profil, typická je vypalovací teplota kolem 850°C po dobu 15min v žárovém pásmu před tím se musí struktura nahřát a potom chladit určitou rychlostí. Celková doba procesu je 2-10hodin podle složitosti struktury. Při velkém rozdílu koeficientu délkové roztažnosti jednotlivých prvků na struktuře je velmi důležité chlazení, které musí probíhat velmi pomalu až na pokojovou teplotu. [1]



**Obrázek 2.4 Vypalový profil technologie LTCC**

Teplotní profil na obrázku 2.4 byl změřen v laboratoři a bude použit při výrobě všech snímačů

### **Povýpalové operace**

Na vrchní vrstvu technologie LTCC lze osadit povrchově montované součástky (SMD) a polovodičové čipy. SMD součástky lze přilepit vodivým lepidlem nebo nanést pájecí pastu a použít pájení přetavením. Další povýpalová operace je dělení desek to se dělá laserem nebo ultrazvukem. Odpory se na vrchní vrstvě dají přesně dostavit trimováním.

Na závěr výrobního procesu se musí každý vyrobený obvod projít inspekcí. [1]

### 3 Snímače tlaku

Tlak, značí se většinou  $p$  je definován jako síla působící kolmo na plochu. Jeho jednotkou je pascal ( $\text{Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Většina základních principů pro snímání tlaku se využívá řadu let v nezměněné formě. Většinou se taky neměří přímo tlak  $p$ , ale jeho silový účinek  $F$ . Tato síla se projeví deformací pružného členu nebo mechanickým napětím, které vzniká v namáhaném členu. [4]

Obvyklé principy měření tlaku jsou:

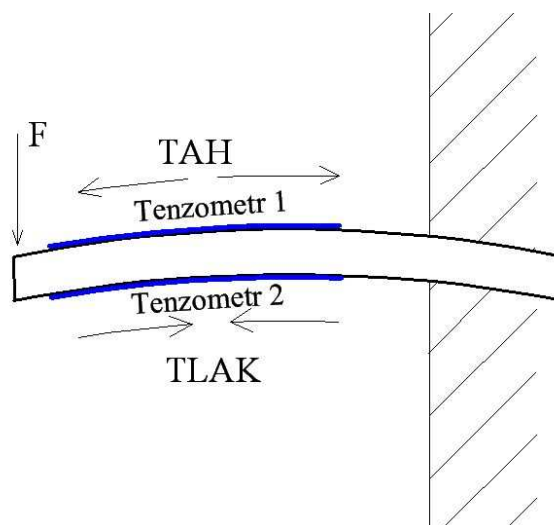
- odporový piezorezistivní
- odporový s tenzometry
- kapacitní
- piezoelektrický
- rezonanční
- indukčnosti
- optický (optoelektronický)

#### Piezorezistivní snímač

Piezorezistivita je jev, kdy při působení tlaku na materiál klesá jeho odpor. Většinou se používá monokrystalický křemík, který je dotován příměsí (donory nebo akceptory), na volbě příměsí závisí znaménko před koeficientem závislosti odporu na mechanickém namáhání, tato závislost je 30x větší než u kovových tenzometrů. Výhody tohoto typu čidla jsou dlouhodobá stabilita, vysoký využitelný signál, malá hystereze a velmi dobrá reprodukovatelnost měření. Nevýhodou je vysoká citlivost křemíkové destičky a subtilních přívodních vodičů na případné agresivní látky. [4]

#### Odporový tenzometr

Tenzometr je zhotoven pomocí tlusté nebo tenké vrstvy na deformačním členu. Princip spočívá v tom, že se působí silou na deformační člen. Deformační člen se prohýbá a tím se protahuje nebo smršťuje tenzometr (viz. Obrázek 3.1) na něm nanesený. Pokud se na destičce vytvoří více tenzometrů a zapojí se do můstku lze minimalizovat závislost na teplotě a zvýšit citlivost. Snímač vyrobený na tomto principu je jednoduchý, levný a vyhoví většině běžných aplikací. [4]



Obrázek 3.1 Deformační člen s tenzometry se znázorněním silového působení

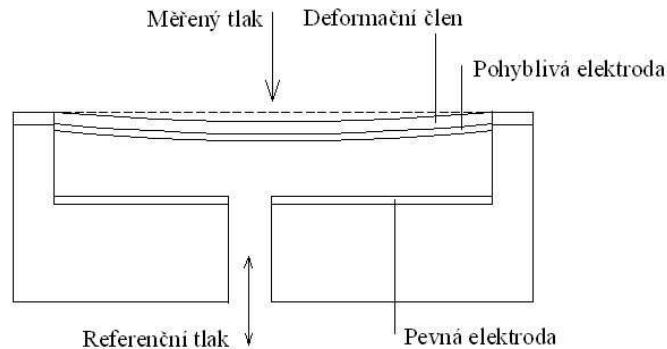
### **Kapacitní snímač**

Základem je dvou nebo více elektrodový systém.

Kapacitu lze změnit několika způsoby:

- vzdáleností elektrod
- změnou jejich plochy
- změnou dielektrika

Nejjednodušší je změnit vzdálenost elektrod a to tak, že jedna elektroda bude upevněna napevno a druhá nanesená deformačním prvkem senzoru. Tlakem se deformační prvek prohne a elektrody se přiblíží (viz. Obrázek 3.2) to způsobí změnu kapacity. [4]



**Obrázek 3.2 Kapacitní čidlo**

### **Piezelektrické a rezonanční snímače**

Využívá se piezelektrického jevu, ten se projevuje jen u nesymetrických krystalů a spočívá ve schopnosti krystalu (popřípadě jiného piezelektrického materiálu) vytvářet elektrický náboj, je-li mechanicky namáhán.

### **Indukční snímače**

Princip indukčního snímače je velice podobný kapacitnímu. Jde o pohyblivou a nepohyblivou cívku. Tlakem se pohyblivá cívka přibližuje a oddaluje a tím se mění vzájemná indukčnost.

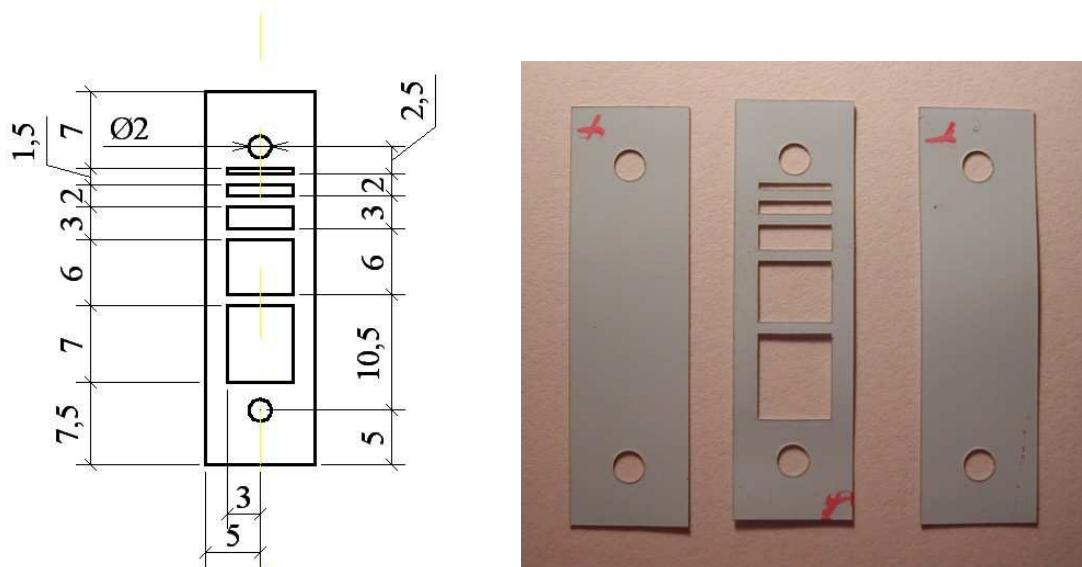
### **Optické snímače**

Princip optických snímačů spočívá v tom, že při ohybu nosníku nebo membrány dochází ke změně intenzity světla, které jde od zdroje k čidlu. Výhody jsou vysoká citlivost, linearita a odolnost vůči rušení, jiskrová bezpečnost a další. Nevýhoda je náročnější konstrukce.

## 4 Praktická část

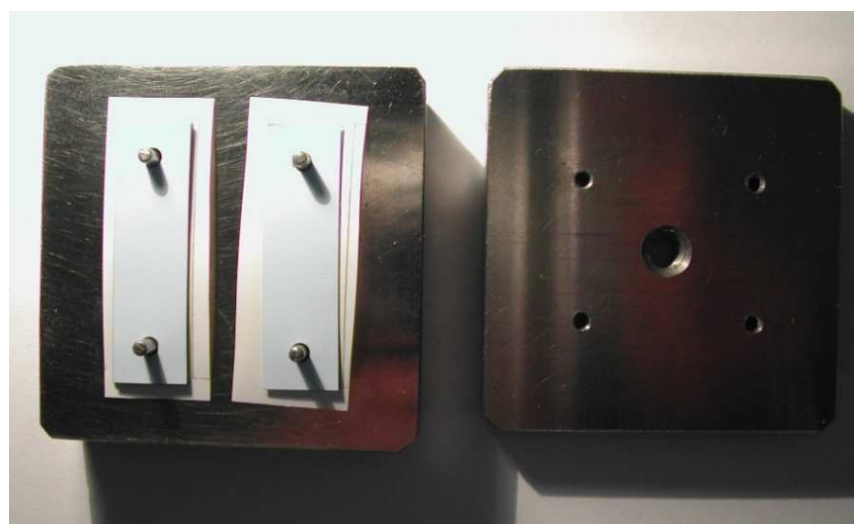
Praktická část se zabývala řezáním keramiky a možnosti vytvoření dutin ve vícevrstvé struktuře. Použitá keramika byla HL 2000 od firmy Heraeus.

Kvalitu řezu určuje opálení keramiky a její proříznutí. Řezání probíhalo při proudu katodou 15A a rychlosti řezu 2mm/s až 5mm/s s krokem 1mm/s. Délka řezu byla 6mm. Opálení keramiky bylo při všech rychlostech obdobné. Aby bylo zpracování co nejefektivnější, volí se nejvyšší rychlost, při které dojde k proříznutí keramiky v tomto případě 3mm/s při proudu 15A.



Obrázek 4.1 Destička s výřezy

Struktura se potom umístí do šablony, kde se za současného působení teploty a tlaku zalaminuje.



Obrázek 4.2 Struktura před laminací



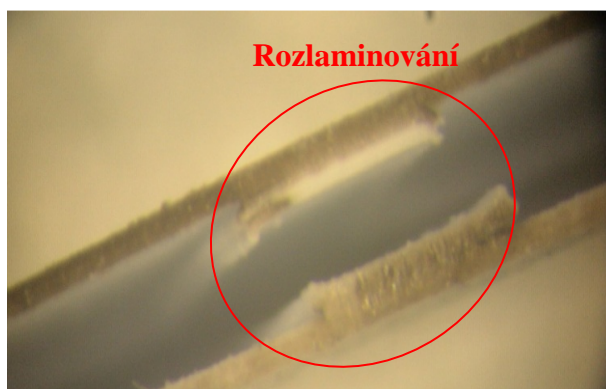
**Obrázek 4.3 Řez destičkou pod mikroskopem**

Díky destičkám s výřezy vznikla ve struktuře dutina (viz obrázek 4.3), dutina na obrázku je ale trochu vypouklá, což může zapříčinit výpal. Možnost vytvořit dutinu ve struktuře se dá využít při konstrukci tlakového čidla..

Při laminaci a výpalu může dojít k různým defektům, možné defekty jsou na obrázku 4.4 a 4.5. Na horní destičce je patrné špatné sesouhlasení při laminaci. Na spodní destičce se při výpalu struktura vlivem pnutí rozpojila.



**Obrázek 4.4 Defekt 3D struktury pod mikroskopem**

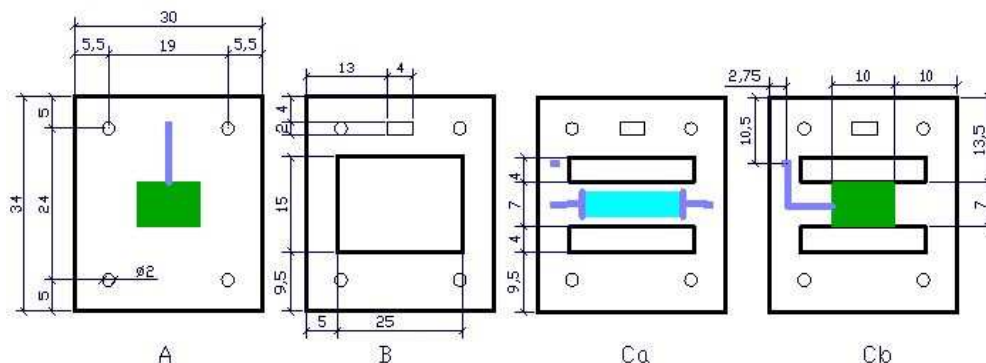


**Obrázek 4.5 Defekt 3D struktury pod mikroskopem**

## 5 Vlastní návrh snímače

Při tvorbě snímače se vychází z poznatku z předchozích kapitol. Tvoření 3D struktur, kapacitní, optický a tenzometrický princip snímání tlaku. V podkapitolách jsou chronologicky seřazeny návrhy jejich realizace a případné problémy které se u nich vyskytly.

### 5.1 Snímač tenzometricko-kapacitní



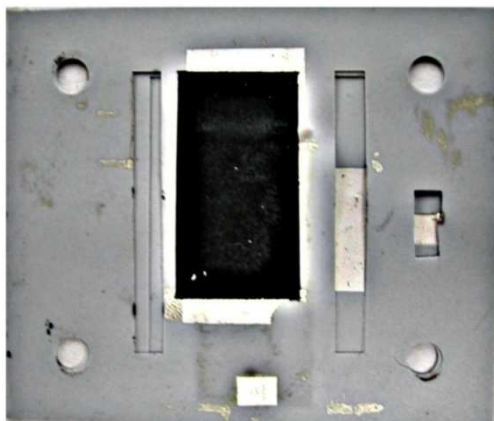
Obrázek 5.1 Návrh čidla s páskovým deformačním členem

#### Vysvětlivky k návrhu

- A- Spodní vrstva
- B- Mezivrstva
- Ca- Vrchní vrstva svrchu
- Cb- Vrchní vrstva zespodu
- Zelená- elektrody kondenzátoru
- Azurová- tenzometr
- Modrá- vodivé cesty

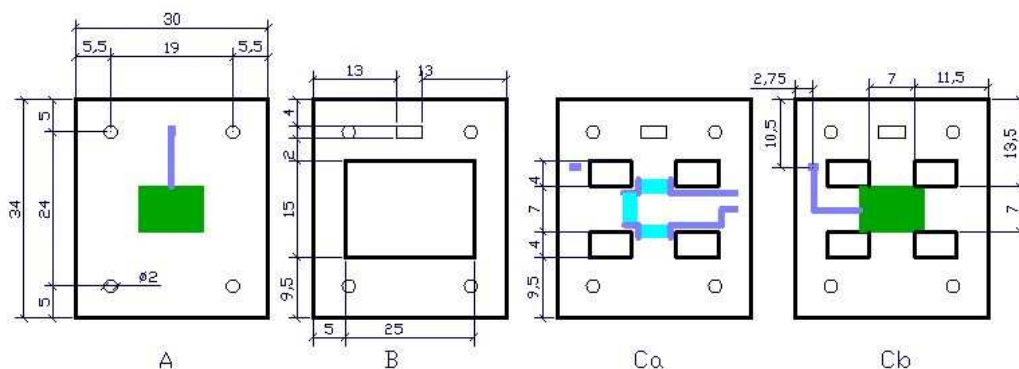
Všechny vodivé cesty, prokovy a elektrody kondenzátorů jsou vytvořeny pomocí **stříbrné vodivé pasty ESL typ 9912K**. Keramika použitá na všech senzorech byla **HL 2000** od firmy **Heraeus**

Na obrázku 5.1 je návrh čidla s tenzometricky kapacitním snímáním. Tenzometr i elektrody kondenzátoru jsou navrženy jako obdélníkové pásky, na obrázku 5.1 je jen jejich orientační velikost a umístění.



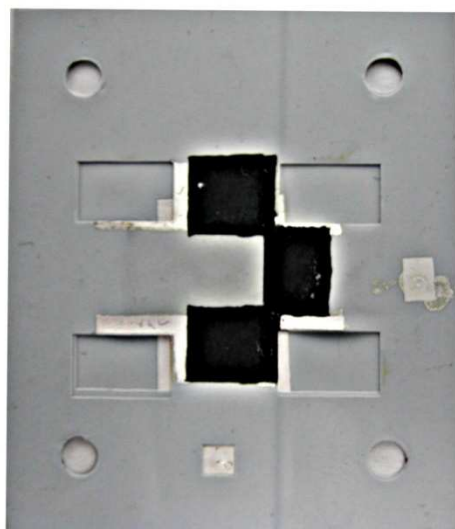
Obrázek 5.2 Realizované čidlo s páskovým deformačním členem

Na obrázku 5.2 je výsledný výrobek. Výrobek je složen z vrstev 1xA 1xB a 1xC. Elektrody kondenzátoru jsou maximální možné s ohledem na konstrukční pravidla, aby byla výsledná kapacita co největší. Tenzometr vyrobený odporovou pastou ESL typ 3911 nebo typ 2712  $10\text{k}\Omega/\square$  (pasta není primárně určená pro LTCC) vypadal dobře, ale vrstva keramiky použitá jako deformační člen byla po výpalu zdeformovaná LTCC to je nejspíš dáno nanesením vrstvy, jak na horní, tak na spodní stranu keramiky. Jelikož byla použita jen jedna mezivrstva, ta má po výpalu asi  $100\mu\text{m}$ , došlo při deformaci ke spojení elektrod kondenzátoru. Velikost odporu tenzometru byla  $17,67\text{k}\Omega$



**Obrázek 5.3 Návrh čidla s křížovým deformačním členem**

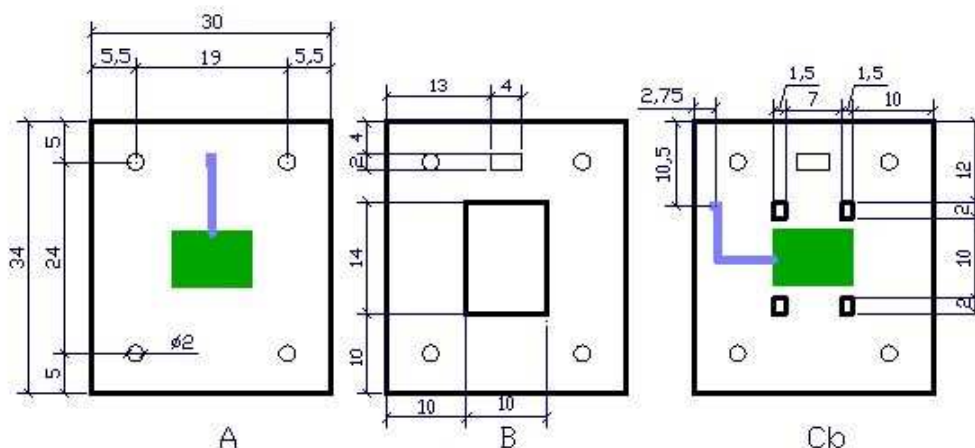
Na obrázku 5.3 je návrh čidla s tenzometricky kapacitním snímáním. Tenzometr je navržen jako 3 pásy a je umístěn v místě kde se předpokládá největší deformace. Stejně jako v předchozím případě je velikost i umístění jen orientační, s tím že v reálu bude snaha udělat elektrody maximálně velké.



**Obrázek 5.4 Realizované čidlo s křížovým deformačním členem**

Výrobek na obrázku 5.4 je stejně jako předchozí poskládan z vrstev 1xA 1xB a 1xC. Při výpalu se vrchní vrstva zdeformovala a došlo ke zkratu elektrod kondenzátoru. To lze dokázat i tím že jeden odpor byl  $5,55\text{k}\Omega$ , druhý  $1,92\text{k}\Omega$  a třetí jen kolem  $100\Omega$ . Oba prototypy byly vyráběny ve stejnou dobu, proto se u obou vyskytl problém s použitím pouze jedné mezivrstvy (vrstva B).

## 5.1 Snímač kapacitní upravený



Obrázek 5.5 Návrh čidla s upraveným křížovým deformačním členem

V tomto návrhu došlo ke změnám.

- Počet mezivrstev se zvýšil na 3
- Zmenšily se výřezy v horní vrstvě

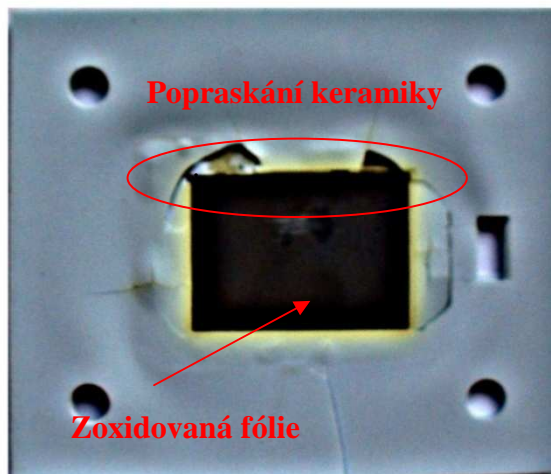


Obrázek 5.6 Kapacitní snímač s menšími výřezy

Tentokrát nedošlo po výpalu k takovým deformacím, aby vznikl zkrat, ale díky výřezům, je ve zúženém místě substrát křehčí, takže je nutná opatrnost při manipulaci.

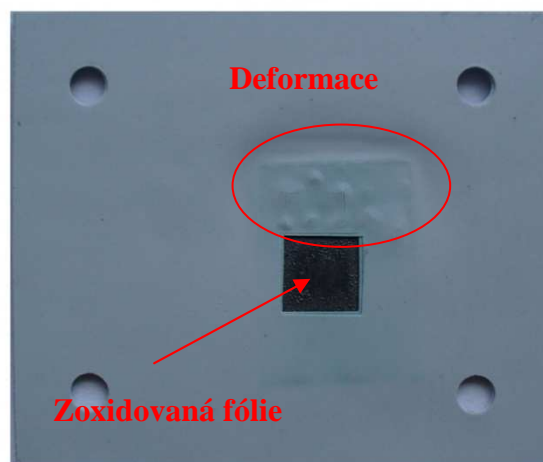
## 5.2 Nahrazení keramického deformačního členu kovovou fólií

V tomto návrhu byla vyzkoušena kovová fólie jako deformační prvek senzoru. Jelikož je kov pružnější než keramika



Obrázek 5.7 Ocelová fólie jako deformační člen

Z obrázku 5.7 lze vidět, že je ocelová fólie zoxidovaná a navíc díky rozdílné teplotní byla keramika v místě, kde byla fólie upevněna, popraskaná.



Obrázek 5.8 Měděná fólie jako deformační člen

Při použití měděné fólie to dopadlo obdobně. Fólie byla taky zoxidovaná, jenom deformace nebyly tak velké, to je dané taky tím, že nebyla použita stejně velká fólie jako v předchozím příkladu.

Pro použití kovové fólie by se muselo splnit několik podmínek

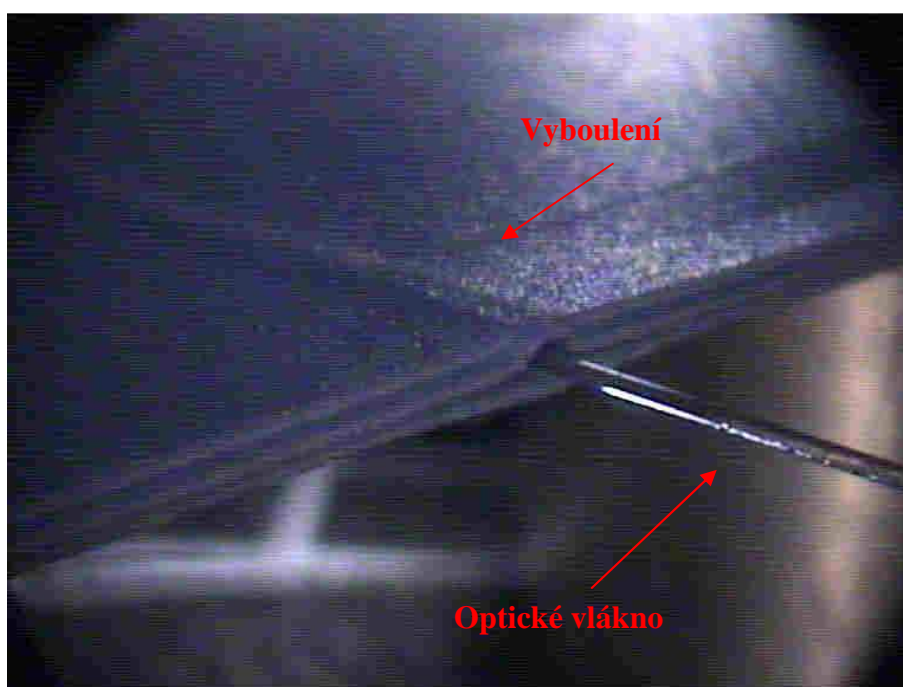
- Ochranná atmosféra nebo kov, který neoxiduje
- Tenká fólie nebo tlustší keramika aby nedošlo k destrukci

### 5.3 Použití optického vlákna v keramice

V tomto pokusu jde o to zjistit, jestli optické vlákno vydrží výpal a jak zdeformuje keramiku. Byly vytvořeny dva prototypy. V prvním případě byly použity dvě vrstvy keramiky jako podložka. Na ně bylo položeno vlákno tak, aby přesahovalo po obou stranách. Třetí vrstvou bylo překryto optické vlákno a všechno bylo laminováno do jednoho celku. V druhém případě byla druhá vrstva z podložky rozříznuta tak aby vzniklo víc místa pro optické vlákno.



Obrázek 5.9 Optické vlákno prosvícené

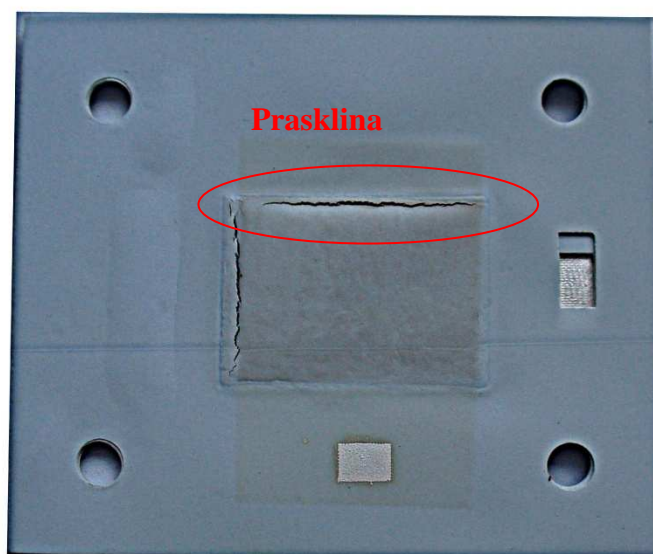


Obrázek 5.10 Optické vlákno pohled ze strany

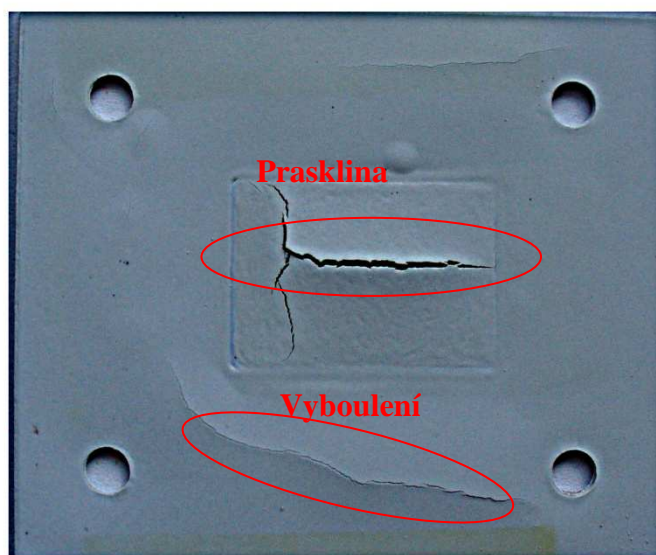
Optické vlákno vydrželo výpal, zvýšila se, ale jeho křehkost což způsobuje problémy při manipulaci. Jako lepší se ukázala vrstva rozříznutá. Optimální řešení je rozříznout tolik vrstev, aby to odpovídalo tloušťce optického vlákna, v našem případě dvě.

#### 5.4 Použití grafitu v dutině

Aby se vrstvy při laminaci nepropadali nebo jinak nedeformovali, byl použit k zaplnění dutiny grafit. Grafit byl ve formě prášku, aby se dal natisknout šablonovým tiskem, byl rozmíchán s xylenem na pastu. Xylenu se použilo minimální množství, protože má negativní vliv na keramiku.



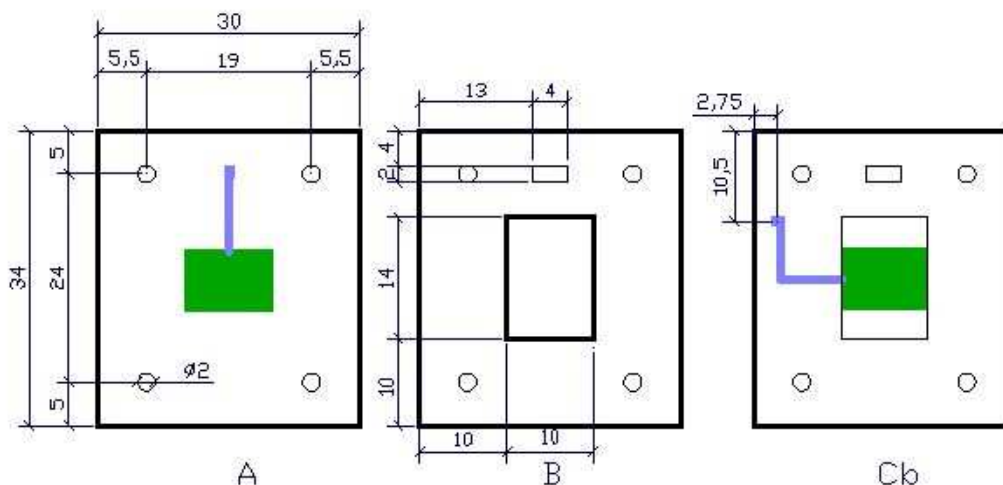
Obrázek 5.11 Čidlo s grafitem v dutině - pohled shora



Obrázek 5.12 Čidlo s grafitem v dutině - pohled ze spodu

Použití xyleny na rozmíchání grafitového prášku se ukázalo jako zcela nevhodné. Xylen rozrušil povrch a substrát pak nevydržel výpal.

## 5.5 Snímač kapacitní s různým počtem vrstev deformačního členu



**Obrázek 5.13 Kapacitní snímač bez výřezu v horní vrstvě**

Na obr. 5.8 není ve vrstvě C výřez, jen znázorněna oblast, která bude tvořit membránu. V této kapitole, se bude měřit změna kapacity na tlaku a maximální použitelný tlak na počtu vrstev.

Všechny měření kapacity byly provedeny na **RLC můstku Agilent HP N1912A**. Působení tlaku se měřilo tlakovým měřičem **SHK 321(500N)** ten ukazoval pouze v kilogramech (kg) nebo newtonech (N). Tlakový měřič byl napájen laboratorním zdrojem **Diametral P130R51D**.

### **Deformační člen tvořen jednou vrstvou keramiky**

Tento snímač byl vyroben s osmi mezivrstvami.

Tabulka 5-1 Působící síla 0N pro snímač s jednou vrstvou

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	4,68	0,015	66,667	4,55E-04	2200,00
2,00	4,64	0,017	58,824	9,43E-04	1060,00
5,00	4,60	0,017	58,824	2,50E-03	400,00
7,00	4,58	0,017	58,824	3,45E-03	290,00
10,00	4,56	0,017	58,824	5,00E-03	200,00
20,00	4,54	0,016	62,500	9,26E-03	108,00
50,00	4,50	0,014	71,429	1,23E-02	81,00
70,00	4,49	0,013	76,923	2,50E-02	40,00
100,00	4,48	0,011	90,909	3,03E-02	33,00
200,00	4,45	0,007	142,857	3,70E-02	27,00
500,00	4,44	0,002	500,000	4,00E-02	25,00
700,00	4,43	0,008	125,000	1,67E-01	6,00
1000,00	4,42	0,015	66,667	5,00E-01	2,00
1200,00	4,41	0,019	52,632	6,67E-01	1,50
1500,00	4,40	0,025	40,000	1,09E+00	0,92
1700,00	4,40	0,030	33,333	1,43E+00	0,70
2000,00	4,38	0,036	27,778	2,04E+00	0,49

Tabulka 5-2 Působící síla 0,1N pro snímač s jednou vrstvou

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	5,91	0,016	62,500	5,68E-04	1760,00
2,00	5,87	0,016	62,500	1,23E-03	813,00
5,00	5,81	0,017	58,824	3,13E-03	320,00
7,00	5,79	0,017	58,824	4,37E-03	229,00
10,00	5,76	0,017	58,824	6,21E-03	161,00
20,00	5,72	0,017	58,824	1,22E-02	82,00
50,00	5,66	0,015	66,667	2,86E-02	35,00
70,00	5,64	0,015	66,667	3,85E-02	26,00
100,00	5,62	0,014	71,429	5,00E-02	20,00
200,00	5,58	0,013	76,923	9,09E-02	11,00
500,00	5,54	0,010	100,000	1,69E-01	5,90
700,00	5,53	0,008	125,000	2,08E-01	4,80
1000,00	5,51	0,007	142,857	2,44E-01	4,10
1200,00	5,50	0,006	166,667	2,50E-01	4,00
1500,00	5,49	0,005	200,000	2,50E-01	4,00
1700,00	5,48	0,004	250,000	2,38E-01	4,20
2000,00	5,47	0,002	500,000	2,04E-01	4,90

**Tabulka 5-3 Působící síla 0,2N pro snímač s jednou vrstvou**

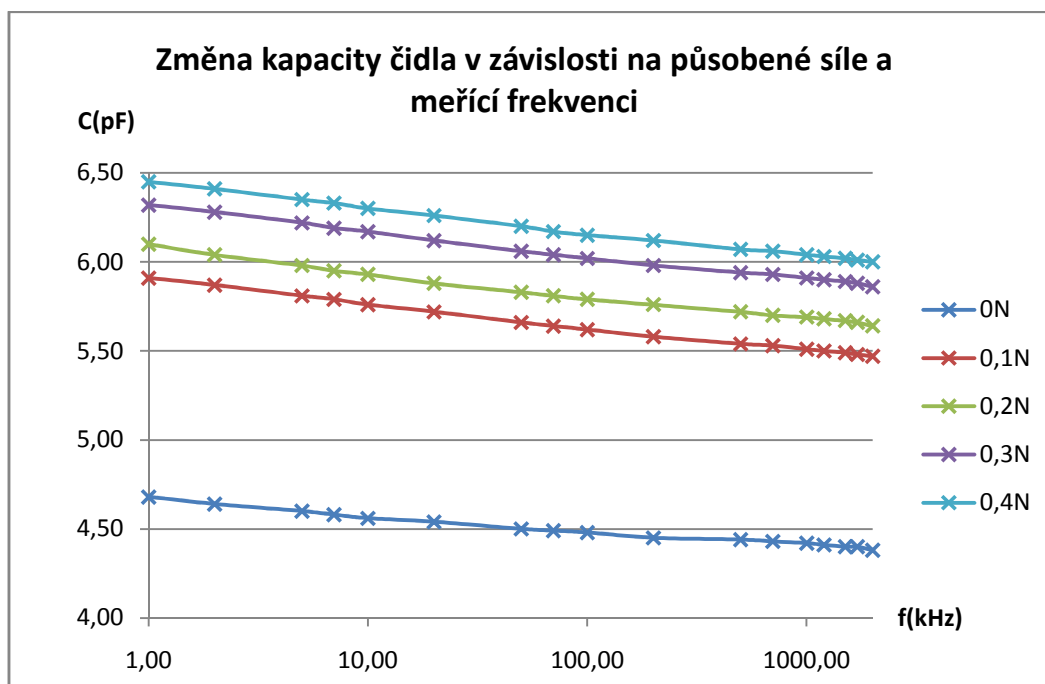
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	6,10	0,016	62,500	5,95E-04	1680,00
2,00	6,04	0,016	62,500	1,25E-03	800,00
5,00	5,98	0,017	58,824	3,17E-03	315,00
7,00	5,95	0,017	58,824	4,39E-03	228,00
10,00	5,93	0,017	58,824	6,25E-03	160,00
20,00	5,88	0,016	62,500	1,19E-02	84,00
50,00	5,83	0,015	66,667	2,70E-02	37,00
70,00	5,81	0,014	71,429	3,57E-02	28,00
100,00	5,79	0,013	76,923	5,00E-02	20,00
200,00	5,76	0,012	83,333	8,62E-02	11,60
500,00	5,72	0,009	111,111	1,67E-01	5,99
700,00	5,70	0,008	125,000	2,03E-01	4,92
1000,00	5,69	0,006	166,667	2,36E-01	4,23
1200,00	5,68	0,005	200,000	2,44E-01	4,10
1500,00	5,67	0,004	250,000	2,50E-01	4,00
1700,00	5,66	0,003	333,333	2,27E-01	4,40
2000,00	5,64	0,002	500,000	1,89E-01	5,30

**Tabulka 5-4 Působící síla 0,3N pro snímač s jednou vrstvou**

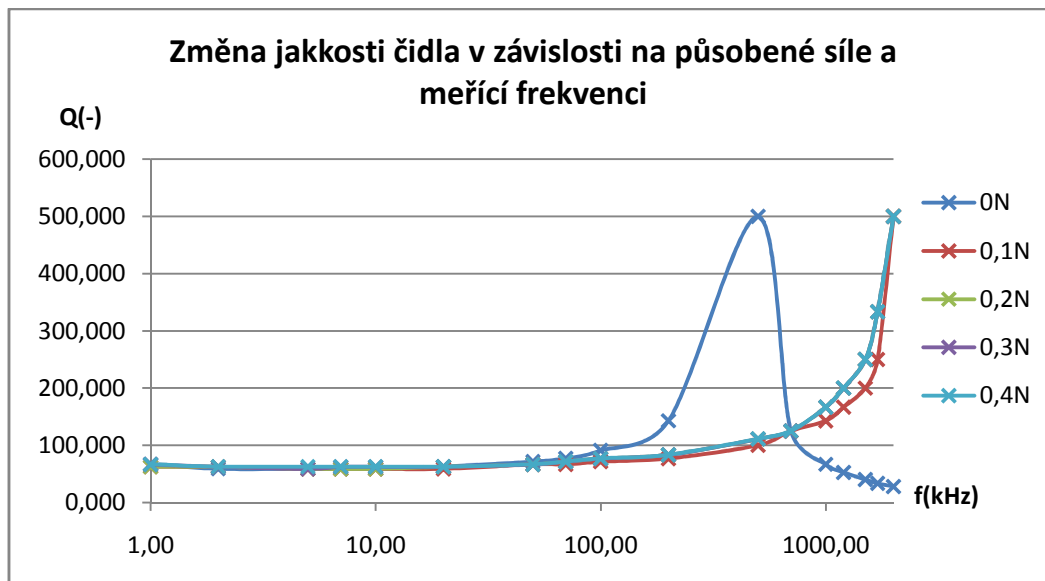
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	6,32	0,015	66,667	6,02E-04	1660,00
2,00	6,28	0,016	62,500	1,28E-03	780,00
5,00	6,22	0,017	58,824	3,26E-03	307,00
7,00	6,19	0,016	62,500	4,55E-03	220,00
10,00	6,17	0,016	62,500	6,54E-03	153,00
20,00	6,12	0,016	62,500	1,28E-02	78,00
50,00	6,06	0,015	66,667	3,03E-02	33,00
70,00	6,04	0,014	71,429	4,00E-02	25,00
100,00	6,02	0,013	76,923	5,56E-02	18,00
200,00	5,98	0,012	83,333	1,00E-01	10,00
500,00	5,94	0,009	111,111	1,79E-01	5,60
700,00	5,93	0,008	125,000	2,17E-01	4,60
1000,00	5,91	0,006	166,667	2,50E-01	4,00
1200,00	5,90	0,005	200,000	2,56E-01	3,90
1500,00	5,89	0,004	250,000	2,50E-01	4,00
1700,00	5,88	0,003	333,333	2,38E-01	4,20
2000,00	5,86	0,002	500,000	1,95E-01	5,14

Tabulka 5-5 Působící síla 0,4N pro snímač s jednou vrstvou

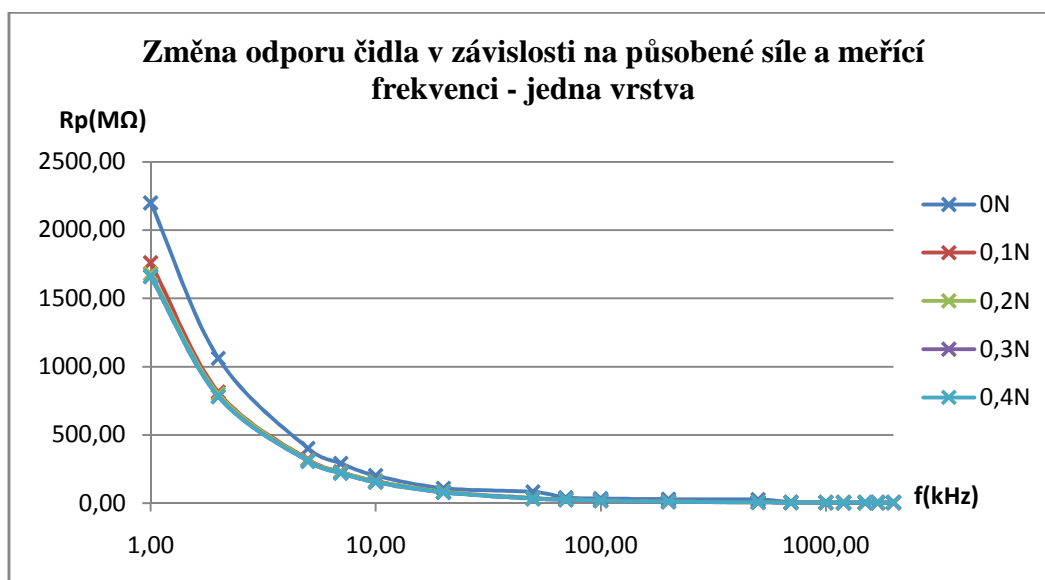
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	6,45	0,015	66,667	6,02E-04	1660,00
2,00	6,41	0,016	62,500	1,28E-03	780,00
5,00	6,35	0,016	62,500	3,26E-03	307,00
7,00	6,33	0,016	62,500	4,55E-03	220,00
10,00	6,30	0,016	62,500	6,54E-03	153,00
20,00	6,26	0,016	62,500	1,28E-02	78,00
50,00	6,20	0,015	66,667	3,03E-02	33,00
70,00	6,17	0,014	71,429	4,00E-02	25,00
100,00	6,15	0,013	76,923	5,56E-02	18,00
200,00	6,12	0,012	83,333	1,00E-01	10,00
500,00	6,07	0,009	111,111	1,79E-01	5,60
700,00	6,06	0,008	125,000	2,17E-01	4,60
1000,00	6,04	0,006	166,667	2,50E-01	4,00
1200,00	6,03	0,005	200,000	2,56E-01	3,90
1500,00	6,02	0,004	250,000	2,50E-01	4,00
1700,00	6,01	0,003	333,333	2,38E-01	4,20
2000,00	6,00	0,002	500,000	1,95E-01	5,14



Obrázek 5.14 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva



**Obrázek 5.15** Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva



**Obrázek 5.16** Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - jedna vrstva

Čidlo s jednou deformační vrstvou bylo použitelné jen do 0,4N a pak došlo k destrukci vrstvy. Kapacita se při změně síly z 0N na 0,4N změnila o 1,77pF při 1kHz., citlivost je tedy 4,43pF/N při 1kHz. Největší potíž při měření byly parazitní kapacity přívodních vodičů, měřící obvod senzoru by proto měl být připojen na co nejkratší vzdálenost, aby se parazitní kapacita co nejvíc snížila. Při výrobě byla použita vícestupňová laminace, nejdřív se zvlášť laminovali mezivrstvy a potom všechno do jednoho celku.

#### **Deformační člen tvořen dvěma vrstvami keramiky**

Tento snímač byl zhotoven se čtyřmi mezivrstvami.

**Tabulka 5-6 Působící síla 0,5 pro snímač s dvěma vrstvami**

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	4,85	0,048	20,833	1,48E-03	676,00
2,00	4,78	0,036	27,778	2,19E-03	457,00
5,00	4,71	0,024	41,667	3,70E-03	270,00
7,00	4,69	0,021	47,619	4,55E-03	220,00
10,00	4,67	0,019	52,632	5,62E-03	178,00
20,00	4,64	0,014	71,429	8,62E-03	116,00
50,00	4,62	0,010	100,000	1,59E-02	63,00
70,00	4,61	0,009	111,111	2,00E-02	50,00
100,00	4,60	0,008	125,000	2,50E-02	40,00
200,00	4,58	0,007	142,857	4,35E-02	23,00
500,00	4,57	0,007	142,857	1,01E-01	9,90
700,00	4,56	0,007	142,857	1,49E-01	6,70
1000,00	4,55	0,008	125,000	2,33E-01	4,30
1200,00	4,55	0,008	125,000	3,03E-01	3,30
1500,00	4,54	0,009	111,111	4,17E-01	2,40
1700,00	4,53	0,010	100,000	5,00E-01	2,00
2000,00	4,52	0,010	100,000	6,25E-01	1,60

**Tabulka 5-7 Působící síla 1,0N pro snímač s dvěma vrstvami**

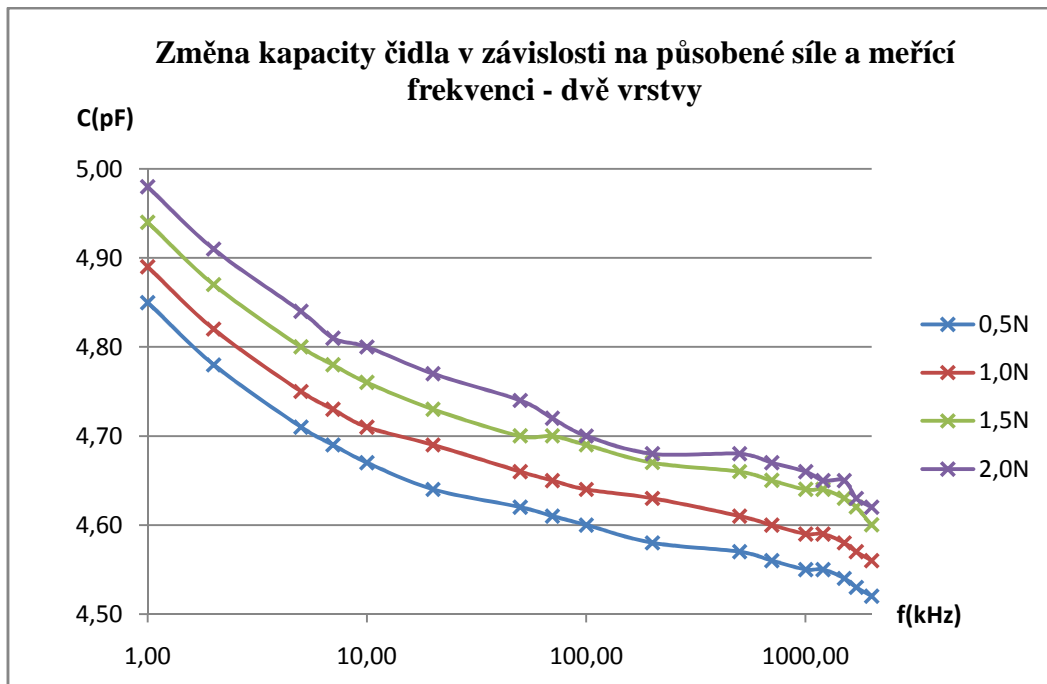
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	4,89	0,047	21,277	1,43E-03	698,00
2,00	4,82	0,035	28,571	2,09E-03	479,00
5,00	4,75	0,024	41,667	3,62E-03	276,00
7,00	4,73	0,021	47,619	4,41E-03	227,00
10,00	4,71	0,018	55,556	5,49E-03	182,00
20,00	4,69	0,014	71,429	8,47E-03	118,00
50,00	4,66	0,010	100,000	1,56E-02	64,00
70,00	4,65	0,009	111,111	1,96E-02	51,00
100,00	4,64	0,008	125,000	2,50E-02	40,00
200,00	4,63	0,007	142,857	4,35E-02	23,00
500,00	4,61	0,007	142,857	1,01E-01	9,90
700,00	4,60	0,007	142,857	1,49E-01	6,70
1000,00	4,59	0,008	125,000	2,38E-01	4,20
1200,00	4,59	0,008	125,000	3,03E-01	3,30
1500,00	4,58	0,009	111,111	4,17E-01	2,40
1700,00	4,57	0,010	100,000	5,00E-01	2,00
2000,00	4,56	0,010	100,000	6,06E-01	1,65

**Tabulka 5-8 Působící síla 1,5N pro snímač s dvěma vrstvami**

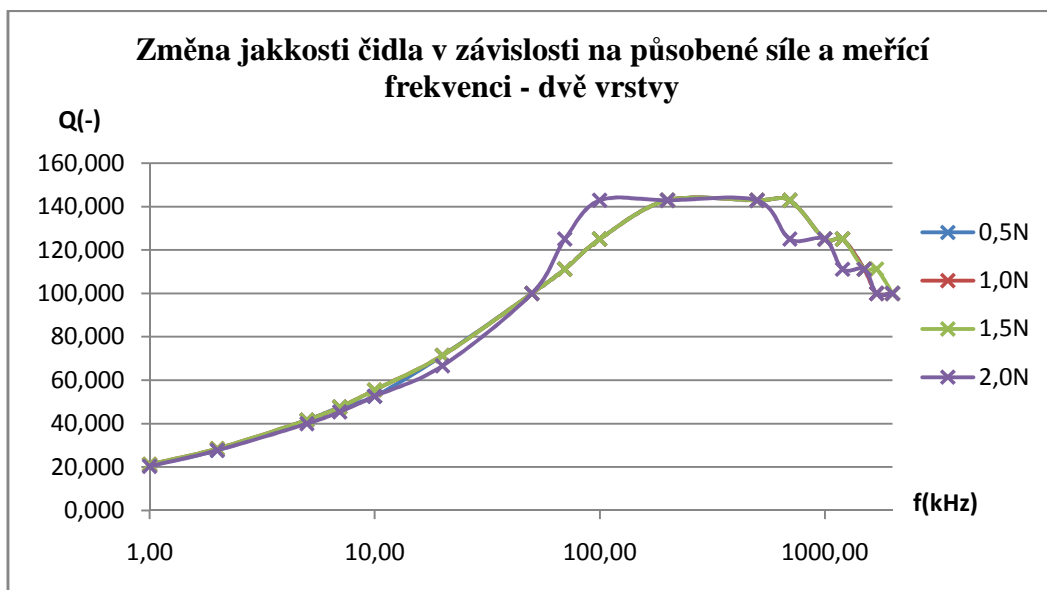
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	4,94	0,047	21,277	1,44E-03	693,00
2,00	4,87	0,035	28,571	2,16E-03	464,00
5,00	4,80	0,024	41,667	3,69E-03	271,00
7,00	4,78	0,021	47,619	4,50E-03	222,00
10,00	4,76	0,018	55,556	5,62E-03	178,00
20,00	4,73	0,014	71,429	8,70E-03	115,00
50,00	4,70	0,010	100,000	1,59E-02	63,00
70,00	4,70	0,009	111,111	2,00E-02	50,00
100,00	4,69	0,008	125,000	2,56E-02	39,00
200,00	4,67	0,007	142,857	4,35E-02	23,00
500,00	4,66	0,007	142,857	1,01E-01	9,90
700,00	4,65	0,007	142,857	1,49E-01	6,70
1000,00	4,64	0,008	125,000	2,38E-01	4,20
1200,00	4,64	0,008	125,000	3,03E-01	3,30
1500,00	4,63	0,009	111,111	4,17E-01	2,40
1700,00	4,62	0,009	111,111	5,00E-01	2,00
2000,00	4,60	0,010	100,000	6,06E-01	1,65

**Tabulka 5-9 Působící síla 2,0 N pro snímač s dvěma vrstvami**

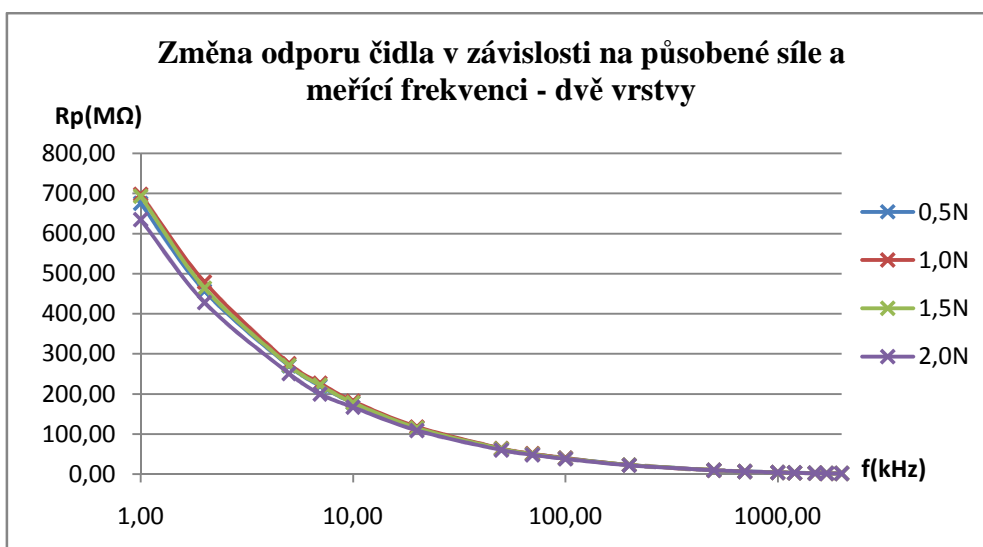
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	4,98	0,049	20,408	1,57E-03	635,00
2,00	4,91	0,036	27,778	2,34E-03	428,00
5,00	4,84	0,025	40,000	3,98E-03	251,00
7,00	4,81	0,022	45,455	5,00E-03	200,00
10,00	4,80	0,019	52,632	5,99E-03	167,00
20,00	4,77	0,015	66,667	9,17E-03	109,00
50,00	4,74	0,010	100,000	1,67E-02	60,00
70,00	4,72	0,008	125,000	2,08E-02	48,00
100,00	4,70	0,007	142,857	2,63E-02	38,00
200,00	4,68	0,007	142,857	4,55E-02	22,00
500,00	4,68	0,007	142,857	1,03E-01	9,70
700,00	4,67	0,008	125,000	1,52E-01	6,60
1000,00	4,66	0,008	125,000	2,38E-01	4,20
1200,00	4,65	0,009	111,111	3,13E-01	3,20
1500,00	4,65	0,009	111,111	4,35E-01	2,30
1700,00	4,63	0,010	100,000	5,00E-01	2,00
2000,00	4,62	0,010	100,000	6,13E-01	1,63



Obrázek 5.17 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy



Obrázek 5.18 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy



**Obrázek 5.19** Závislost odporu čidla na měřící frekvenci pro různé síly - dvě vrstvy

Při použití dvou vrstev keramiky jako membrány sneslo čidlo sílu 2N. V proměřené oblasti je závislost kapacity na síle téměř lineární. Při 1kHz je změna kapacity pouze 0,13pF v rozmezí od 0,5N do 2N. Tím pádem je citlivost pouze 0,087pF/N, oproti senzoru měřeném v předchozím případě je citlivost znatelně menší. Při výrobě byla použita vícevrstevná laminace, nejdřív se zvlášť laminovali vrstvy B a zvlášť vrstvy C, nakonec se všechny bloky laminovaly do jednoho celku

#### Deformační člen tvořen třemi vrstvami keramiky

Tento snímač byl zhotoven se čtyřmi mezivrstvami.

**Tabulka 5-10** Působící síla 0N pro snímač s jednou vrstvou

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G(μS)	Rp(MΩ)
1,00	10,33	0,035	28,571	2,27E-03	440,00
2,00	10,13	0,036	27,778	4,63E-03	216,00
5,00	9,90	0,037	27,027	1,18E-02	85,00
7,00	9,81	0,037	27,027	1,64E-02	61,00
10,00	9,72	0,037	27,027	2,27E-02	44,00
20,00	9,54	0,036	27,778	4,35E-02	23,00
50,00	9,34	0,034	29,412	1,00E-01	10,00
70,00	9,28	0,033	30,303	1,33E-01	7,50
100,00	9,20	0,031	32,258	1,82E-01	5,50
200,00	9,08	0,028	35,714	3,23E-01	3,10
500,00	8,94	0,023	43,478	6,67E-01	1,50
700,00	8,88	0,021	47,619	8,33E-01	1,20
1000,00	8,83	0,019	52,632	1,08E+00	0,93
1200,00	8,78	0,018	55,556	1,22E+00	0,82
1500,00	8,74	0,017	58,824	1,41E+00	0,71
1700,00	8,70	0,016	62,500	1,52E+00	0,66
2000,00	8,65	0,015	66,667	1,64E+00	0,61

Tabulka 5-11 Působící síla 0,1N pro snímač s jednou vrstvou

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	10,45	0,034	29,412	2,23E-03	449,00
2,00	10,26	0,035	28,571	4,55E-03	220,00
5,00	10,05	0,036	27,778	1,15E-02	87,00
7,00	9,98	0,036	27,778	1,61E-02	62,00
10,00	9,90	0,036	27,778	2,27E-02	44,00
20,00	9,73	0,035	28,571	4,35E-02	23,00
50,00	9,53	0,033	30,303	1,01E-01	9,90
70,00	9,46	0,032	31,250	1,35E-01	7,40
100,00	9,39	0,030	33,333	1,82E-01	5,50
200,00	9,26	0,027	37,037	3,23E-01	3,10
500,00	9,12	0,022	45,455	6,67E-01	1,50
700,00	9,07	0,020	50,000	8,33E-01	1,20
1000,00	9,01	0,018	55,556	1,03E+00	0,97
1200,00	8,98	0,017	58,824	1,15E+00	0,87
1500,00	8,94	0,015	66,667	1,28E+00	0,78
1700,00	8,92	0,014	71,429	1,33E+00	0,75
2000,00	8,88	0,012	83,333	1,41E+01	0,07

Tabulka 5-12 Působící síla 0,2N pro snímač s jednou vrstvou

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	10,49	0,034	29,412	2,25E-03	444,00
2,00	10,31	0,035	28,571	4,61E-03	217,00
5,00	10,10	0,036	27,778	1,18E-02	85,00
7,00	10,01	0,037	27,027	1,64E-02	61,00
10,00	9,93	0,037	27,027	2,33E-02	43,00
20,00	9,76	0,036	27,778	4,55E-02	22,00
50,00	9,56	0,034	29,412	1,03E-01	9,70
70,00	9,47	0,033	30,303	1,37E-01	7,30
100,00	9,41	0,031	32,258	1,85E-01	5,40
200,00	9,28	0,028	35,714	3,33E-01	3,00
500,00	9,13	0,023	43,478	6,67E-01	1,50
700,00	9,08	0,021	47,619	8,33E-01	1,20
1000,00	9,02	0,019	52,632	1,09E+00	0,92
1200,00	8,99	0,017	58,824	1,20E+00	0,83
1500,00	8,95	0,016	62,500	1,35E+00	0,74
1700,00	8,92	0,015	66,667	1,43E+00	0,70
2000,00	8,88	0,013	76,923	1,54E+00	0,65

Tabulka 5-13 Působící síla 0,4N pro snímač s jednou vrstvou

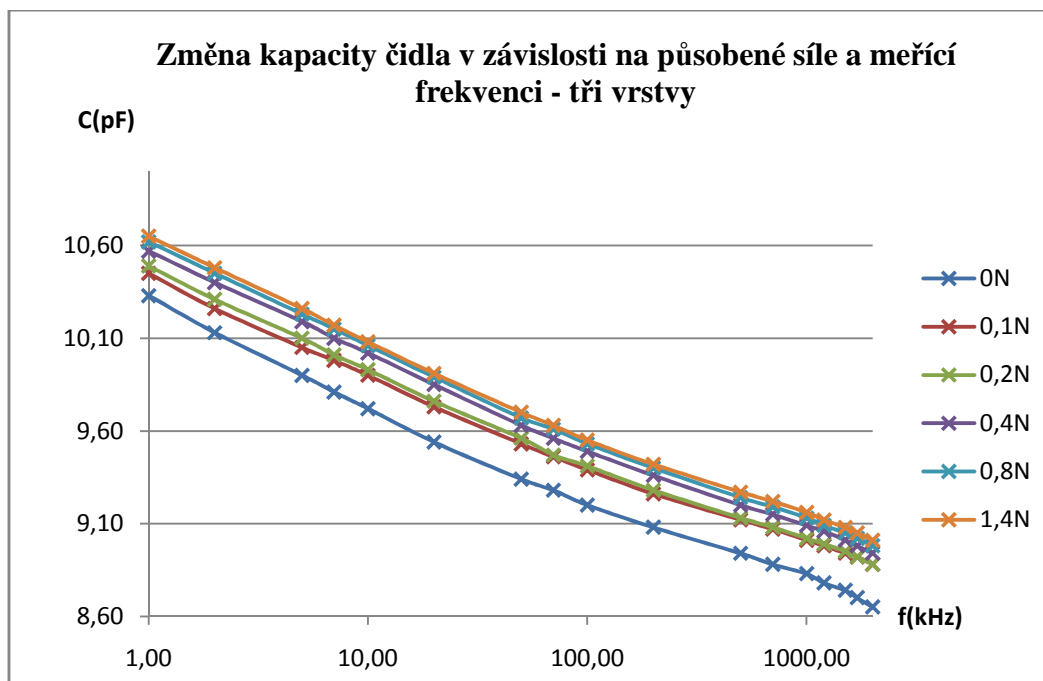
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	10,57	0,034	29,412	2,27E-03	440,00
2,00	10,40	0,036	27,778	4,67E-03	214,00
5,00	10,19	0,037	27,027	1,19E-02	84,00
7,00	10,10	0,037	27,027	1,67E-02	60,00
10,00	10,02	0,037	27,027	2,38E-02	42,00
20,00	9,85	0,037	27,027	4,55E-02	22,00
50,00	9,63	0,035	28,571	1,06E-01	9,40
70,00	9,56	0,034	29,412	1,45E-01	6,90
100,00	9,49	0,033	30,303	1,96E-01	5,10
200,00	9,36	0,029	34,483	3,57E-01	2,80
500,00	9,20	0,025	40,000	7,14E-01	1,40
700,00	9,15	0,022	45,455	9,09E-01	1,10
1000,00	9,09	0,020	50,000	1,14E+00	0,88
1200,00	9,06	0,018	55,556	1,27E+00	0,79
1500,00	9,01	0,017	58,824	1,41E+01	0,07
1700,00	8,98	0,015	66,667	1,49E+00	0,67
2000,00	8,94	0,014	71,429	1,59E+00	0,63

Tabulka 5-14 Působící síla 0,8N pro snímač s jednou vrstvou

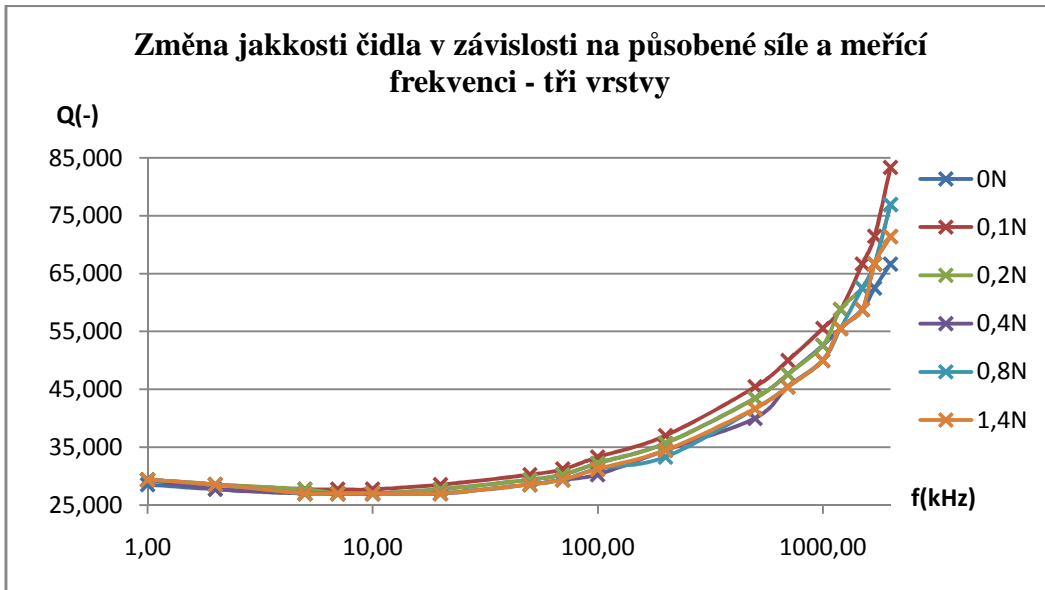
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	10,62	0,034	29,412	2,27E-03	440,00
2,00	10,45	0,035	28,571	4,67E-03	214,00
5,00	10,23	0,037	27,027	1,19E-02	84,00
7,00	10,15	0,037	27,027	1,67E-02	60,00
10,00	10,06	0,037	27,027	2,38E-02	42,00
20,00	9,89	0,037	27,027	4,55E-02	22,00
50,00	9,67	0,035	28,571	1,06E-01	9,40
70,00	9,61	0,034	29,412	1,43E-01	7,00
100,00	9,53	0,032	31,250	1,92E-01	5,20
200,00	9,40	0,030	33,333	3,45E-01	2,90
500,00	9,24	0,024	41,667	7,14E-01	1,40
700,00	9,19	0,022	45,455	9,09E-01	1,10
1000,00	9,13	0,020	50,000	1,12E+00	0,89
1200,00	9,09	0,018	55,556	1,23E+00	0,81
1500,00	9,05	0,016	62,500	1,37E+00	0,73
1700,00	9,02	0,015	66,667	1,43E+00	0,70
2000,00	8,98	0,013	76,923	1,52E+00	0,66

Tabulka 5-15 Působící síla 1,4N pro snímač s jednou vrstvou

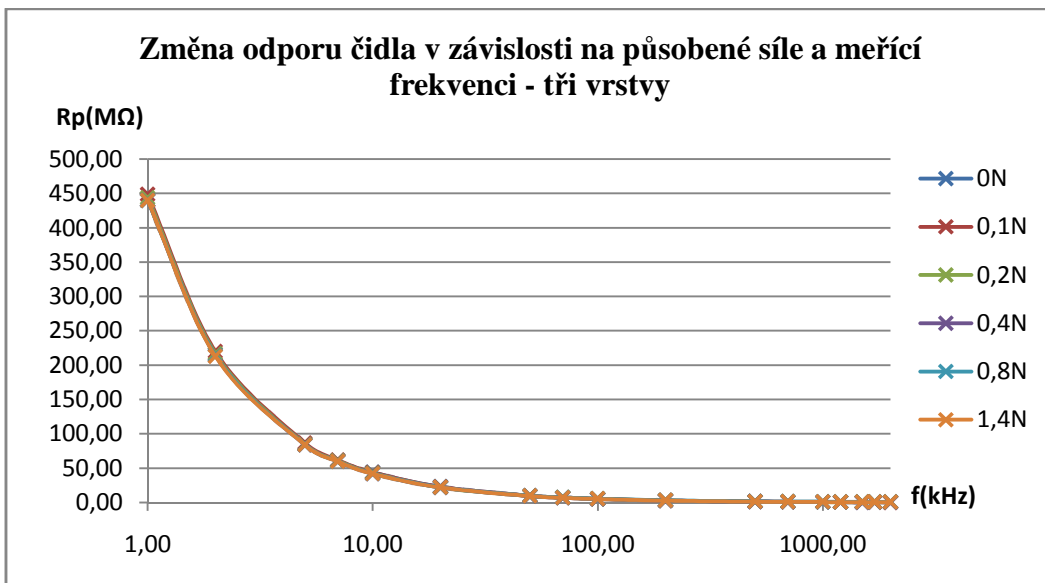
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	10,65	0,034	29,412	2,27E-03	440,00
2,00	10,48	0,035	28,571	4,69E-03	213,00
5,00	10,26	0,037	27,027	1,19E-02	84,00
7,00	10,17	0,037	27,027	1,67E-02	60,00
10,00	10,08	0,037	27,027	2,38E-02	42,00
20,00	9,91	0,037	27,027	4,55E-02	22,00
50,00	9,70	0,035	28,571	1,05E-01	9,50
70,00	9,63	0,034	29,412	1,43E-01	7,00
100,00	9,55	0,032	31,250	1,89E-01	5,30
200,00	9,42	0,029	34,483	3,45E-01	2,90
500,00	9,27	0,024	41,667	7,14E-01	1,40
700,00	9,22	0,022	45,455	9,09E-01	1,10
1000,00	9,16	0,020	50,000	1,14E+00	0,88
1200,00	9,12	0,018	55,556	1,27E+00	0,79
1500,00	9,08	0,017	58,824	1,43E+00	0,70
1700,00	9,05	0,015	66,667	1,47E+00	0,68
2000,00	9,01	0,014	71,429	1,61E+00	0,62



Obrázek 5.20 Závislost kapacity na měřicí frekvenci pro různé síly - tři vrstvy



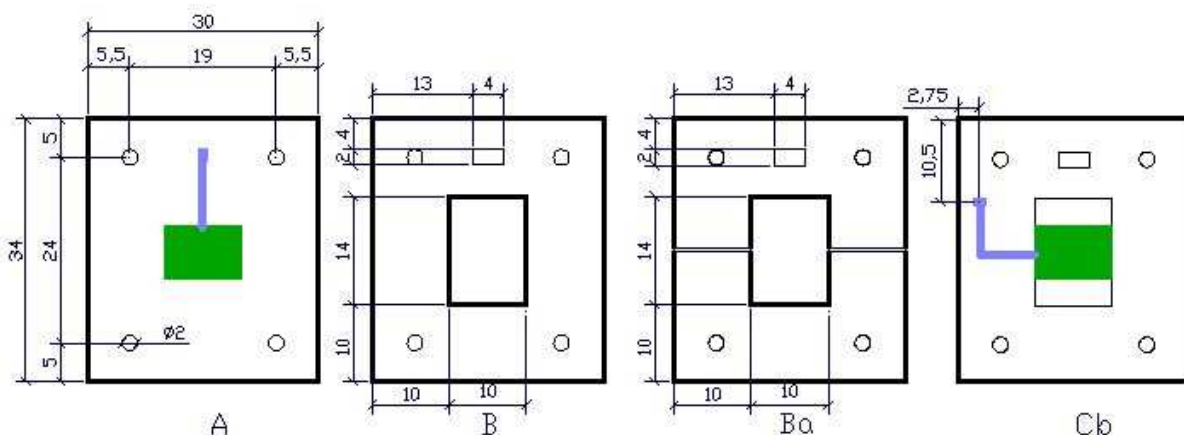
**Obrázek 5.21** Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy



**Obrázek 5.22** Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy

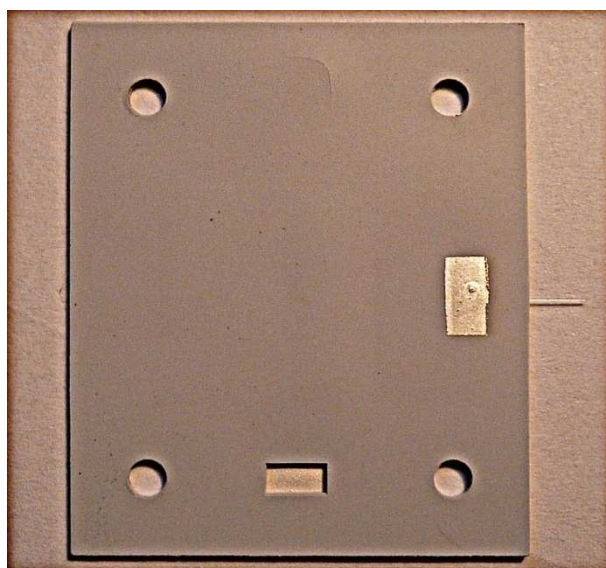
Změna kapacity v rozmezí 0N – 1,4N je 0,33pF při 1kHz, citlivost je 0,22pF/N. Překvapivě je maximální použitá síla u třech vrstev jen 1,4N, oproti dvou vrstvám (2N). To je nejspíš dáno špatnou laminací nebo krátkodobým přetížením při měření. Při výrobě byla použita víceúrovňová laminace, nejdřív se zvlášť laminovali vrstvy B a zvlášť vrstvy C, nakonec se všechny bloky laminovaly do jednoho celku

## 5.6 Snímač opticko-kapacitní



Obrázek 5.23 Návrh opticko-kapacitního čidla

Na obrázku 5.26 je ve vrstvě Ba laserem vyřezána drážka pro upevnění optického kabelu. Struktura se skládá ze: 2x A, 2x B, 2x Ba, 1xB a 3xC celkově 10 vrstev.



Obrázek 5.24 Realizovaný snímač s opticko-kapacitním převodem

Na obrázku 5.27 je zhotovený snímač s opticko-kapacitním převodem. Při výrobě byla použita při laminaci pec místo sušičky a po laminování byla struktura zřetelně kvalitnější. Při výrobě byla použita vícevrstevná laminace, nejdřív se zvlášť laminovali vrstvy A, všechny vrstvy B a vrstvy C a nakonec se jednotlivé bloky laminovaly do jednoho celku. Při testování se nepodařilo prosvítit z jedné strany na druhou ani laserem ani obyčejným světlem, k otestování prosvícení bylo použito zařízení pro optickou kontrolu spojů Ersascope. Jednotlivé optické kabely lze prosvítit bez potíží, světlo se dostane i přes dutinu na druhou stranu. Problém je v posunutí optického kabelu. Posunutí bylo asi 1mm, což je při průměru kabelu 200 $\mu$ m velká nepřesnost. Aby bylo možné použít optický kabel, musí být dodržena maximální přesnost.

**Tabulka 5-16 Působící síla 0N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami**

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	6,80	0,024	41,667	9,17E-04	1090,00
2,00	6,75	0,018	55,556	1,45E-03	688,00
5,00	6,69	0,014	71,429	2,81E-03	356,00
7,00	6,68	0,012	83,333	3,62E-03	276,00
10,00	6,66	0,011	90,909	4,76E-03	210,00
20,00	6,63	0,010	100,000	8,13E-03	123,00
50,00	6,60	0,008	125,000	1,67E-02	60,00
70,00	6,59	0,007	142,857	2,22E-02	45,00
100,00	6,58	0,007	142,857	2,86E-02	35,00
200,00	6,56	0,006	166,667	5,26E-02	19,00
500,00	6,54	0,007	142,857	1,47E-01	6,80
700,00	6,53	0,008	125,000	2,33E-01	4,30
1000,00	6,52	0,009	111,111	4,00E-01	2,50
1200,00	6,51	0,010	100,000	5,26E-01	1,90
1500,00	6,50	0,012	83,333	7,69E-01	1,30
1700,00	6,49	0,013	76,923	9,09E-01	1,10
2000,00	6,47	0,014	71,429	1,14E+00	0,88

**Tabulka 5-17 Působící síla 0,5N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami**

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	7,00	0,020	50,000	9,39E-04	1065,00
2,00	6,95	0,016	62,500	1,50E-03	668,00
5,00	6,90	0,013	76,923	2,88E-03	347,00
7,00	6,88	0,012	83,333	3,72E-03	269,00
10,00	6,86	0,011	90,909	4,90E-03	204,00
20,00	6,83	0,009	111,111	8,33E-03	120,00
50,00	6,80	0,008	125,000	1,69E-02	59,00
70,00	6,79	0,007	142,857	2,04E-02	49,00
100,00	6,78	0,006	166,667	2,94E-02	34,00
200,00	6,76	0,006	166,667	5,56E-02	18,00
500,00	6,74	0,007	142,857	1,49E-01	6,70
700,00	6,73	0,008	125,000	2,38E-01	4,20
1000,00	6,72	0,009	111,111	4,00E-01	2,50
1200,00	6,71	0,010	100,000	5,26E-01	1,90
1500,00	6,70	0,011	90,909	7,69E-01	1,30
1700,00	6,68	0,012	83,333	9,09E-01	1,10
2000,00	6,67	0,013	76,923	1,12E+00	0,89

Tabulka 5-18 Působící síla 1N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami

f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	7,11	0,020	50,000	8,85E-04	1130,00
2,00	7,06	0,016	62,500	1,42E-03	705,00
5,00	7,01	0,012	83,333	2,80E-03	357,00
7,00	6,99	0,011	90,909	3,60E-03	278,00
10,00	6,98	0,011	90,909	4,81E-03	208,00
20,00	6,95	0,009	111,111	8,26E-03	121,00
50,00	6,92	0,008	125,000	1,69E-02	59,00
70,00	6,91	0,007	142,857	2,22E-02	45,00
100,00	6,90	0,006	166,667	2,94E-02	34,00
200,00	6,87	0,006	166,667	5,56E-02	18,00
500,00	6,86	0,007	142,857	1,49E-01	6,70
700,00	6,85	0,008	125,000	2,33E-01	4,30
1000,00	6,84	0,009	111,111	4,00E-01	2,50
1200,00	6,83	0,010	100,000	5,26E-01	1,90
1500,00	6,81	0,011	90,909	7,69E-01	1,30
1700,00	6,80	0,012	83,333	9,09E-01	1,10
2000,00	6,78	0,013	76,923	1,14E+00	0,88

Tabulka 5-19 Působící síla 1,5N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami

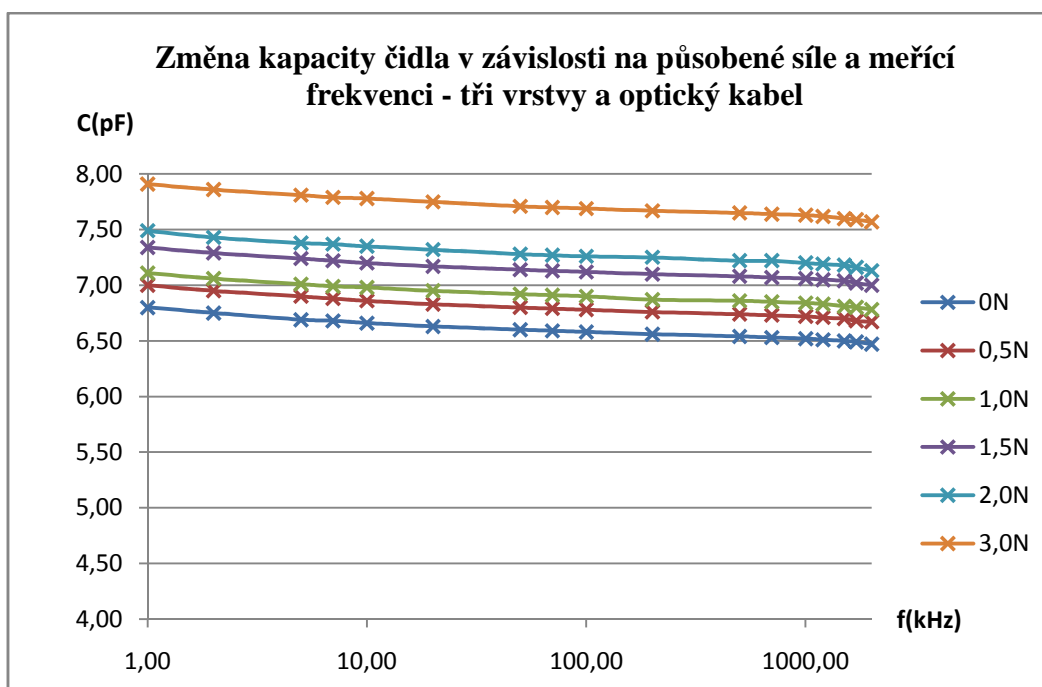
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	7,34	0,019	52,632	8,77E-04	1140,00
2,00	7,29	0,015	66,667	1,46E-03	685,00
5,00	7,24	0,012	83,333	2,84E-03	352,00
7,00	7,22	0,011	90,909	3,66E-03	273,00
10,00	7,20	0,010	100,000	4,88E-03	205,00
20,00	7,17	0,009	111,111	8,40E-03	119,00
50,00	7,14	0,007	142,857	1,72E-02	58,00
70,00	7,13	0,007	142,857	2,27E-02	44,00
100,00	7,12	0,006	166,667	3,03E-02	33,00
200,00	7,10	0,006	166,667	5,56E-02	18,00
500,00	7,08	0,007	142,857	1,52E-01	6,60
700,00	7,07	0,008	125,000	2,38E-01	4,20
1000,00	7,06	0,009	111,111	4,00E-01	2,50
1200,00	7,05	0,010	100,000	5,26E-01	1,90
1500,00	7,04	0,011	90,909	7,69E-01	1,30
1700,00	7,02	0,012	83,333	9,09E-01	1,10
2000,00	7,00	0,013	76,923	1,14E+00	0,88

**Tabulka 5-20 Působící síla 2N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami**

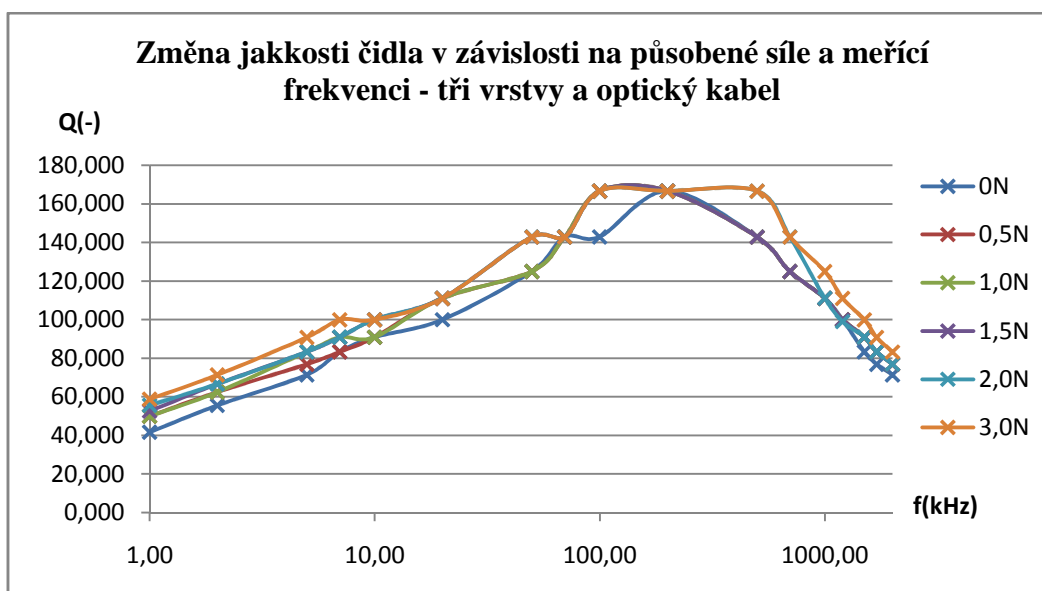
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	7,49	0,018	55,556	8,70E-04	1150,00
2,00	7,43	0,015	66,667	1,41E-03	708,00
5,00	7,38	0,012	83,333	2,82E-03	355,00
7,00	7,37	0,011	90,909	3,62E-03	276,00
10,00	7,35	0,010	100,000	4,78E-03	209,00
20,00	7,32	0,009	111,111	8,40E-03	119,00
50,00	7,28	0,007	142,857	1,75E-02	57,00
70,00	7,27	0,007	142,857	2,27E-02	44,00
100,00	7,26	0,006	166,667	3,03E-02	33,00
200,00	7,25	0,006	166,667	5,56E-02	18,00
500,00	7,22	0,006	166,667	1,52E-01	6,60
700,00	7,22	0,007	142,857	2,38E-01	4,20
1000,00	7,20	0,009	111,111	4,00E-01	2,50
1200,00	7,19	0,010	99,010	5,26E-01	1,90
1500,00	7,18	0,011	90,909	7,69E-01	1,30
1700,00	7,16	0,012	83,333	9,09E-01	1,10
2000,00	7,13	0,013	76,923	1,15E+00	0,87

**Tabulka 5-21 Působící síla 3N pro opticko-kapacitní snímač s třemi vrstvami**

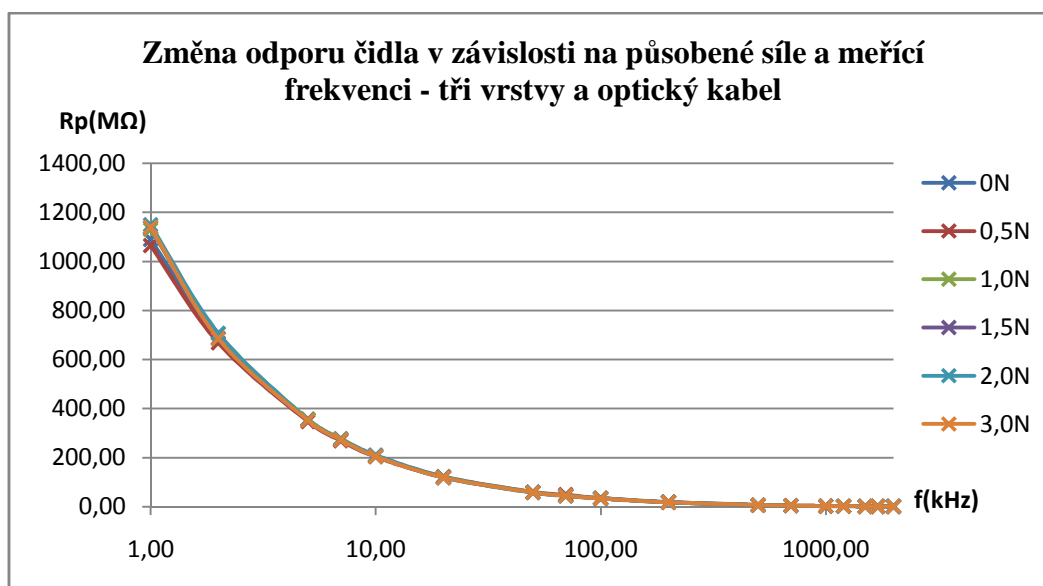
f(kHz)	C(pF)	D(-)	Q(-)	G( $\mu$ S)	Rp(M $\Omega$ )
1,00	7,91	0,017	58,824	9,09E-04	1100,00
2,00	7,86	0,014	71,429	1,45E-03	690,00
5,00	7,81	0,011	90,909	2,91E-03	344,00
7,00	7,79	0,010	100,000	3,72E-03	269,00
10,00	7,78	0,010	100,000	4,95E-03	202,00
20,00	7,75	0,009	111,111	8,70E-03	115,00
50,00	7,71	0,007	142,857	1,82E-02	55,00
70,00	7,70	0,007	142,857	2,38E-02	42,00
100,00	7,69	0,006	166,667	3,13E-02	32,00
200,00	7,67	0,006	166,667	5,88E-02	17,00
500,00	7,65	0,006	166,667	1,56E-01	6,40
700,00	7,64	0,007	142,857	2,44E-01	4,10
1000,00	7,63	0,008	125,000	4,17E-01	2,40
1200,00	7,62	0,009	111,111	5,56E-01	1,80
1500,00	7,60	0,010	100,000	7,69E-01	1,30
1700,00	7,59	0,011	90,909	9,09E-01	1,10
2000,00	7,57	0,012	83,333	1,18E+00	0,85



Obrázek 5.25 Závislost kapacity na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel



Obrázek 5.26 Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel



**Obrázek 5.27** Závislost jakosti čidla na měřící frekvenci pro různé síly - tři vrstvy a optický kabel

Čidlo zvládlo zatížení silou 3N , poté se objevila prasklina na deformačním členu a další měření by pak bylo neobjektivní, čidlo zvládlo krátkodobě zatížení až kolem 4N. Pro rozmezí 0N-3N, byla změna kapacity 1,11pF při 1kHz , citlivost je tedy 0,37pF/N.

## Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s technologií LTCC, technologiemi vytváření vrstev, principy snímání tlaku a pomocí těchto znalostí navrhnout a zkonstruovat snímač se dvěma typy snímání. Jako stěžejní bylo použito kapacitní snímání, které bylo doplněno tenzometrickým a následně optickým snímáním. Konstrukce kapacitního snímače byla realizována v několika verzích pro různý počet vrstev keramiky v deformačním členu. Při použití jedné vrstvy keramiky jako deformační člen mělo čidlo nejlepší citlivost  $4,43\text{pF/N}$ , ale bylo možné měřit sílu jen  $0,4\text{N}$ , při konstrukci tohoto čidla bylo použito osm mezivrstev. Při použití dvou vrstev v deformačním členu byla citlivost velmi malá jen  $0,087\text{pF/N}$ , čidlo ale zvládlo daleko vyšší zatížení ( $2\text{N}$ ), při konstrukci tohoto čidla byly použity jen čtyři mezivrstvy. Při třech vrstvách v deformačním členu bez optického kabelu sneslo čidlo jen  $1,4\text{N}$  což je oproti dvěma vrstvám pokles, citlivost byla  $0,22\text{pF}$ , počet mezivrstev byl čtyři. Jako nejlepší se ukázalo čidlo se třemi vrstvami v deformačním členu s optickým kabelem, zvládlo síly do  $3\text{N}$  a mělo citlivost  $0,37\text{pF/N}$ , čidlo bylo vytvořeno se čtyřmi mezivrstvami. Tenzometry se ukázaly jako nevhodné, protože odporová vrstva deformovala při výpalu keramiku, proto se přešlo k optickému snímání. U optického snímání nastaly problémy s vzájemným posunutím optických kabelů. Tím, že došlo při výpalu k posunutí, nebylo možné dostat paprsek světla z jednoho optického vlákna do druhého. Zkonstruovat senzor s dvěma způsoby snímání se tedy nepovedlo, ale kapacitní snímač je použitelný pro malé síly. V rámci práce se provedlo ještě několik experimentů, které měli zlepšit výsledný snímač. Vyplnění dutiny, aby se při výpalu nebortila, grafitovou pastou (grafit+xylen) se ukázalo jako nevhodné, xylen působil destruktivně na keramiku. Kovová fólie, která mohla nahradit keramický deformační člen, při výpalu zoxidovala a navíc popraskala keramika, v které byla fólie upevněná. Dále byla vyzkoušena vícestupňová laminace, při použití se vrstvy nad dutinou nebortily.

## Použitá literatura

[1] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. v Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 379 stran. ISBN 80-214-3292-6.

[2] ŠAVEL, J. *Elektrotechnologie materiály a technologie v elektronice a elektrotechnice*. 2. rozšířené vydání, v Praze: BEN- technická literatura, 2003. 264 stran. ISBN 80-7300-120-9

[3] KUBICA, L. *Elektrotechnická měření*. 2. dotisk 1. vydání , v Praze: BEN- technická literatura, 2003. 256 stran. ISBN 80- 7300-022-9

[4] BEJČEK, L. a VACULÍK, J. Snímače tlaku – přehled trhu. *Automatizace* [online], leden 2006 [cit. 17. prosince 2008]. Dostupné na WWW:<<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1025>>.

[5] [www.ltcc.de](http://www.ltcc.de)

[6] Slosarčík *Stanislav*, et al. 3D struktury na bázi LTCC keramiky pro oblast mikrosystémů a hybridních senzorů. *AT&P journal PLUS2* [online], 2006 [cit. 17. prosince 2008]. Dostupné na WWW:< [http://www.atpjournal.sk/atpplus/archiv/2006\\_2/PDF/plus32\\_36.pdf](http://www.atpjournal.sk/atpplus/archiv/2006_2/PDF/plus32_36.pdf)>.