



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SBĚR ENERGIE POMOCÍ MEMS

MEMS BASED ENERGY HARVESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Klempa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Jaroslav Klempa

ID: 174213

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Sběr energie pomocí MEMS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami sbírání energie a její přeměny na energii elektrickou. Zaměřte se tenkovrstvá zařízení realizovatelná na křemíkovém substrátu. Popište možnosti výroby z technologického hlediska. Následně navrhnete zařízení pro sběr energie z mechanických vibrací. Celé zařízení nasimulujte a zaměřte se na frekvence mechanických vibrací, které mohou být běžně využitelné. Vyroberte zařízení dle teoretických poznatků získaných z fyzikálních simulací. U zhotoveného zařízení se pokuste základními metodami ověřit jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Pekárek, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje metodám sběru volné energie z prostředí kolem nás. V první části jsou popsány základní principy přeměny volné energie na energii elektrickou. Navazující část pojednává o piezoelektřině a piezoelektrických materiálech. Převážná většina popisovaných materiálů nachází uplatnění ve výrobě mikroelektromechanických struktur. Další oddíl je věnován literárnímu průzkumu již navržených a vyrobených piezoelektrických energetických harvesterů. Navazující část práce se věnuje simulacím navržených struktur v programu ANSYS® Workbench. Následuje část s popisem výroby struktur a finální část se zabývá jejich charakterizací z hlediska generovaného výkonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetický harvesting, MEMS, vibrace, piezoelektřina, ANSYS Workbench, výrobní technologie

ABSTRACT

This work is dedicated to principles of energy harvesting or scavenging from free energy around us. Energy harvesting principles are described in the first part. Following chapter is devoted to description of piezoelectricity and piezoelectric materials. Next part researches already reported results on piezoelectric energy harvesters. Following chapter shows simulations on designed structures in ANSYS® Workbench. Next the fabrication of the structures is described. Measurement are made regarding to maximum generated power.

KEYWORDS

Energy harvesting, MEMS, vibrations, piezoelectricity, ANSYS Workbench, fabrication technologies

KLEMPA, J. Sběr energie pomocí MEMS. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2019. 61 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Imrich Gablech, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Sběr energie pomocí MEMS jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Imrichu Gablechovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc, ochotu, trpělivost, a hlavně za cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Pekárkovi, Ph.D. za cenné konzultace a konstruktivní kritiku mé práce. Velké díky patří také Ing. Janu Kunzovi a Ing. Jiřímu Fialkovi Ph.D. za zpřístupnění měřicí stanice a pomoc s měřením. Díky patří také Ing. Janu Hrabinovi, Ph.D. a Ing. Miroslavě Holé, Ph.D. z Ústavu přístrojové techniky AV ČR za sestavení a zpřístupnění interferometru.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

„Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.“

OBSAH

Úvod	1
1 Typy sběru energie	2
1.1 Solární	2
1.2 Tepelné	3
1.3 Mechanické	4
2 Piezoelektrické harvestery	6
2.1 Piezoelektrický jev	6
2.2 Používané piezoelektrické materiály	8
2.3 Náhradní model PEH	11
2.4 Řídicí obvody pro PEH	12
3 Současná řešení a výzkum PEH	15
3.1 PEH na bázi AlN	15
3.2 PEH na bázi PZT	17
3.3 PEH na bázi dalších piezoelektrických materiálů	17
3.4 Porovnání dosažených výsledků	18
4 Simulace a návrh zařízení	19
4.1 Simulace a charakterizace testovacích struktur	20
4.2 Simulace navržených PEH	24
5 Výroba PEH	29
5.1 Depozice a vlastnosti AlN vrstvy	30
5.2 Výrobní proces	33
6 Charakterizace	41
6.1 Interferometrické měření	41
6.2 Měření na vibračním stolku	43
7 Závěr	46
Literatura	47
Seznam obrázků	50
Seznam zkratk	52
Seznam symbolů a veličin	53

ÚVOD

V posledních letech stále přibývá elektronických zařízení, a tak je otázka energetického hlediska a udržitelného prostředí velmi důležitá. V současné době je většina energie dodávána z neobnovitelných zdrojů. Obnovitelné zdroje dosahují mnohem menšího zastoupení a jejich umístění bývá často geograficky limitováno. Tato práce se však nebude zabývat náhradou fosilních paliv, ale bude zkoumat využití energetického sběru energie pro malé autonomní senzory a systémy jako náhradu baterií. Z tohoto důvodu se práce bude věnovat převážně technologiím mikroelektromechanických systémů (MEMS). Procesem sběru energie neboli také energy harvestingem (EH), se rozumí sběr nevyužité energie z volného okolního prostředí vhodným prostředkem a její následný přenos zpět na energii využitelnou. Energetický tok generovaný prostředím se však může lišit v několika řádech od radiových frekvencí ($0,001 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) až do energie slunečního záření ($100 \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$) [1].

MEMS jsou zařízení o velikosti od jednotek μm až do jednotek mm , které v sobě kombinují jak elektrické, tak mechanické fyzikální principy. Jejich výhoda spočívá právě v jejich velikosti umožňující je umístit prakticky kdekoliv. MEMS zařízení nacházejí uplatnění v různých oblastech jako například ve vojenství, vzdálených meteorologických stanicích, Bluetooth sluchátkách a dalších [1].

Typická spotřeba bezdrátových senzorů bývá v jednotkách mW v aktivním módu a desítkách μW mimo aktivní mód. S ohledem na velikosti senzorů a na malé množství generované energie je v současné době výzkum zaměřen na zvýšení generovaného výkonu a efektivní usměrnění a skladování této energie. energii generovanou z EH nelze přímo využít jako zdroj elektrické energie. Je potřeba vždy použít úložné prvky, jako jsou například kondenzátory nebo baterie. Technologické procesy pro výrobu MEMS však umožňují přípravu jednoduchých kondenzátorů nebo baterií [2] přímo na čipu [1, 3].

Mezi nejznámější způsoby přeměny energie se řadí fotovoltaický princip využívaný v solárních elektrárnách. Tento způsob je však velmi náročný na prostor a v miniaturních měřících tak nedosahuje velkých zisků jako ostatní metody. Další možností zisku energie je přeměna odpadního tepla pomocí termoelektrického jevu, což se jeví jako velmi efektivní, vzhledem k tomu, že přibližně dvě třetiny veškerého generovaného tepla jsou odpadní. Velkým problémem této metody je však velmi nízká účinnost [4]. Pyroelektrický jev je další metoda k přeměně odpadního tepla, která dosahuje vyšší efektivity než termoelektrický jev. Elektromagnetické vlnění je v dnešní době prakticky všude přítomné, a proto se naskýtá možnost využití tohoto vlnění k přeměně energie. Vysokofrekvenční a rádiové signály mohou být použity nejen k EH ale současně také k přenášení informací [1].

Neposlední možností je získávání energie z vibrací, kterou se bude tato práce zabývat. Tato metoda využívá např. piezoelektrického jevu, kdy se energie vibrací mění na elektrickou energii. Na příklad lithiová baterie dokáže dodat $30 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ po jeden rok nebo $30 \text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$ po 10 h. Naproti tomu vibrační generátor je schopen pracovat se stejným zatížením po dobu 50 let. Mezi další přednosti těchto generátorů patří především neomezený operační čas, žádné chemické a provozní odpady, bezúdržbovost a nízká cena výměny [5].

1 TYPY SBĚRU ENERGIE

V této kapitole budou představeny základní používané principy přeměny energie od nejnámějších solárních technologií, přes tepelné principy, až k odlišným druhům vibračních metod – elektromagnetické, elektrostatické a piezoelektrické. Vize pro EH je znázorněna na obr. 1.1. Očekává se, že tato technologie v budoucnosti dospěje do takového stádia, kdy nebude potřeba baterií a veškeré energie bude dodávána pomocí EH.

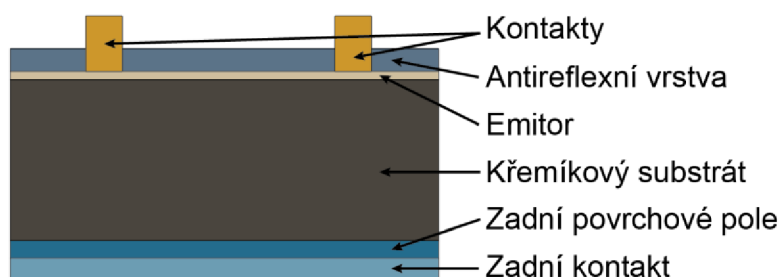


Obr. 1.1: Vize pro EH.

1.1 Solární

Obnovitelné zdroje energie k sobě v poslední době přitahují mnoho pozornosti. Mezi všemi možnými druhy obnovitelných energií je sluneční považována za nejatraktivnější díky jejímu vysokému výkonovému potenciálu. Množství sluneční energie, které dopadne na povrch Země za jednu hodinu, by odpovídalo roční spotřebě celého lidstva [6]. To je však z několika důvodů neproveditelné. Mezi hlavní příčiny se řadí extrémní plocha potřebná pro provozování fotovoltaických (FV) panelů a jejich efektivita. Z hlediska napájení malých zařízení se energetická hustota FV panelů pohybuje ve velmi širokém rozpětí od $0,5 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ do $1000 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ v interiérech. Venkovní sluneční záření může dosahovat hodnot až $100 \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Hlavním problémem FV panelů je však nestálost světelných podmínek. FV panely tak pracují s maximálním možným výkonem jen velmi omezenou část své životnosti [1].

Efektivita současných FV panelů dosahuje hodnot $\approx 26\%$, což se blíží teoretickému limitu $\approx 33,7\%$ jednoduchého PN přechodu. Při dopadu světla na povrch FV panelu dojde k absorpci fotonu a vytvoření páru elektron-díra. Pokud je vnějším elektrickým polem zabráněno jejich rekombinaci, dojde k jejich rozdělení. K dosažení nejvyšší pravděpodobnosti, a tedy i efektivit separace nosičů náboje je PN přechod umístěn blízko povrchu FV panelu (Obr. 1.2)[6].



Obr. 1.2: Znázornění struktury FV panelu

1.2 Tepelné

Ke sběru tepelné energie je využíváno dvou principů: termoelektrického jevu a pyroelektrického jevu. Oba jevy přeměňují tepelnou energii na elektrickou, ale pro efektivní práci potřebují různé podmínky. Termoelektrický jev využívá teplotního gradientu, zatímco pyroelektrický jev využívá změny teploty v čase. Přístup obou jevů má několik výhod, mezi které se řadí: žádné pohybující se části, vysoká spolehlivost, dlouhá životnost, bezúdržbovost a přímý převod tepla na elektrickou energii. Dominantním jevem je však termoelektrický jev, nejčastěji realizován pomocí termoelektrického generátoru (TEG). S rozvojem technologií MEMS se přechází k mikro-TEG (μ -TEG), jehož výhody leží právě v malých rozměrech a vysokých generovaných napětích. Hlavní, a zvláště kritická, nevýhoda TEG spočívá ve velmi nízké efektivitě přeměny tepla na elektrickou energii (do $\approx 5\%$). Důvodem je nízká efektivita současných termoelektrických materiálů [7, 8].

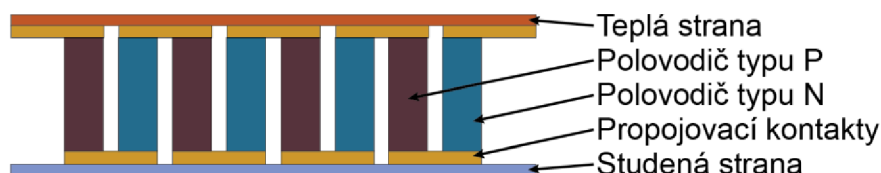
1.2.1 Pyroelektrický jev

Pyroelektrické materiály vykazují spontánní polarizaci bez působení elektrického pole. Při zvyšování teploty rostou tepelné vibrace atomů v krystalu, a tudíž se efekt spontánní polarizace snižuje. Pokud je tento materiál v rozpojeném obvodu, nemají volné náboje kam uniknout a napříč materiálem se vytváří elektrický potenciál. Pokud se obvod uzavře, začne protékat proud. Při ochlazování se materiál chová naopak – atomy se znovu natačí do svých dipólů a přitahují tak volné elektrony zpět a tím změni směr protékajícího proudu. Cyklické změny teploty jsou tedy zásadní pro provoz pyroelektrických generátorů [9].

Ačkoliv tyto generátory jsou méně rozšířené než TEG, dosahují mnohem vyšších efektivit (až 50%). Sebald a kol. ukázali, že použití lineárního pyroelektrického materiálu dává až desetinásobně vyšší energetické zisky než použití termoelektrického materiálu. Největším problémem těchto generátorů je však jejich využití, vzhledem k tomu že cyklické změny teploty nejsou běžným jevem [8, 9].

1.2.2 Termoelektrický jev

Typická struktura TEG je znázorněna na obr. 1.3. Generátor vždy obsahuje tzv. teplou a studenou stranu. Teplo je přiváděno na teplou stranu a odváděno ze studené. Mezi těmito částmi se nachází termočlánky pracující se Seebackovým efektem, nejčastěji vytvářené z křemíku typu N a P. Ty jsou střídavě spojeny kovovým ohmickým kontaktem ke zlepšení převodu tepla. Ke zvýšení výstupního napětí jsou termočlánky zapojovány do série. Z pohledu tepelného přenosu jsou články zapojeny paralelně [7].



Obr. 1.3: Struktura vertikálního μ -TEG

Výstupní napětí V_{OUT} termočlánku dle Seebackova jevu je dáno rovnicí (1.1):

$$V_{OUT} = \alpha_{pn}\Delta T_G = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) \quad (1.1)$$

Kde α_p a α_n jsou Seebackovi koeficienty pro N a P polovodiče, α_{pn} je koeficient termočlánku, ΔT_G je rozdíl teplot mezi teplou a studenou stranou, T_H a T_C jsou teploty na teplé a studené straně a N je počet termočlánků. Při vzniku určitého teplotního gradientu proudí nosiče z teplé strany ke studené. Na studené straně tak vzniká napětí, dle typu nosičů v daném polovodiči. Pokud se mezi tyto dva polovodiče připojí zatěžovací odpor R, začne obvodem protékat proud [7].

1.3 Mechanické

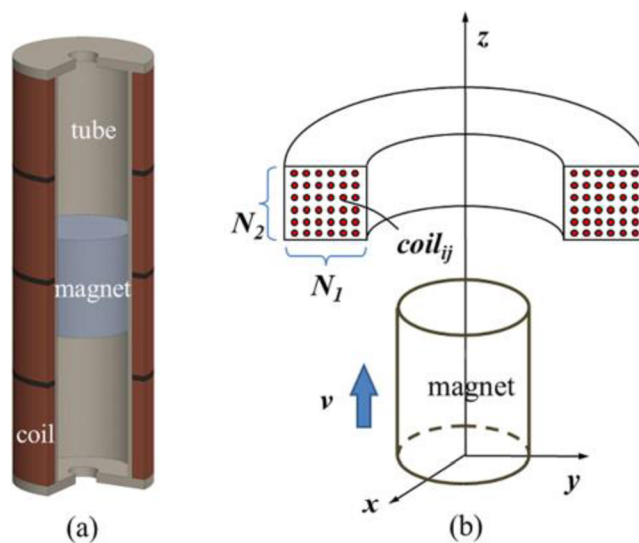
Získávání energie z okolních vibrací je pravděpodobně nejrozšířenějším způsobem přeměny energie z důvodu všudypřítomných vibrací. Mechanické harvestery se mohou rozdělit do několika skupin, podle typu působící energie:

- Elektromagnetické harvestery (EMEH)
- Elektrostatické harvestery (EEH)
- Piezoelektrické harvestery (PEH)

Každý z těchto způsobů nachází uplatnění v jiných aplikacích. V porovnání s elektromagnetickým a elektrostatickým má však piezoelektrický způsob mnohem vyšší energetickou hustotu a je nejvhodnější pro získávání energie z okolních vibrací [10].

1.3.1 Elektromagnetické

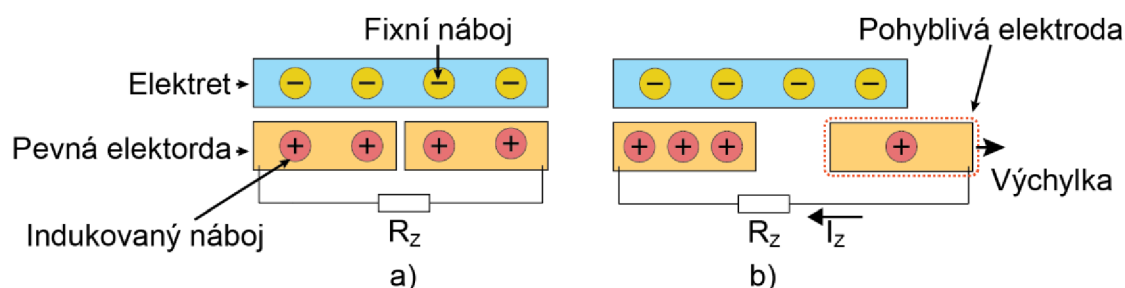
Princip elektromagnetické indukce je založen na Faradayovu zákonu, který říká, že změna magnetického toku skrz vodivou smyčku indukuje v dané smyčce elektrické napětí. Nejjednodušší provedení lze sestavit pomocí cívky a pohybujícího se magnetu (Obr. 1.4). Tato metoda je využívána pro velmi nízké frekvence (2-20 Hz). EMEH jsou zpravidla velmi robustní a produkují velké proudy, jelikož jejich vnitřní odpor je v porovnání s ostatními mechanickými metodami relativně nízký. K činnosti nepotřebují externí zdroj energie a nepotřebují mechanický kontakt mezi pohybujícími se částmi. Nevýhodami jsou hlavně obtížná integrace do MEMS a mikroelektronických technologií, nízké generované napětí a komplikovaná výroba vhodných magnetů s vysokým magnetickým tokem. K zajištění dobré efektivity je nutné používat elektronické součástky s nízkým napěťovým poklesem [11, 12].



Obr. 1.4: Příklad EMEH velikosti AA tužkové baterie [12]

1.3.2 Elektrostatické

Tento typ harvesterů je nejčastěji realizován pomocí principu proměnné kapacity, který je dán Gausovým zákonem. Jev se projevuje změnou napětí na kondenzátoru při změně jeho kapacity. Prakticky se toho dosahuje pomocí jedné pevné elektrody a druhé elektrody, která je připevněna na pohyblivou část (Obr. 1.5) Elektrody jsou odděleny vzduchem nebo jiným dielektrikem. EEH se mohou rozdělit do dvou typů podle použitých materiálů – EEH nevyužívající elektrety a EEH pracující s elektrety, tedy materiály, které jsou v kvazi-permanentní elektrické polarizaci. Elektrety se používají jako povrch elektrod a pracují tedy obdobně jako „elektrostatický“ magnet. Po depozici je nutné tyto materiály nabít – nejčastěji používaným procesem je vystavení materiálu korónovému výboji po dobu 3–30 minut. Používaná napětí pro výboj jsou v rozmezí -5 kV až -8 kV [11].



Obr. 1.5: Princip EEH využívající elektret

Hlavní nevýhody této metody spočívají v nutnosti externího zdroje napětí k nabíjení elektrody (u EEH bez elektretů), riziko dielektrického průrazu, velké ztráty na parazitních kapacitách, vysoká výstupní impedance a nízký generovaný proud. Z hlediska výrobních procesů je však tato metoda vhodná pro velmi nízké frekvence, produkuje vysoké napětí (2-10 V) a je jednoduše vyrobitelná pomocí již zaběhlých technologií, využívaných např. pro výrobu mikro-akcelometrů [11].

1.3.3 Piezoelektrické

Piezoelektrické převodníky jsou žádané v oblasti MEMS EH z důvodů jednoduché konfigurace a vyšší konverzní efektivity než EMEH nebo EEH. Základem pro PEH je přeměna mechanického pnutí uvnitř struktury na elektrickou energii za použití piezoelektrických převodníků spojených s rezonanční strukturou. Základní strukturou pro PEH je jednostranně vetknutý nosník se závažím, na kterém je nanesena sendvičová struktura piezoelektrického materiálu a dvou elektrod. Tato struktura je pak schopna díky rezonanci přenést malé budící amplitudy do větších, a tudíž dojde k větší výchylce závaží na konci PEH. To zapříčiní větší generovaný náboj [13]. Vzhledem k významnosti PEH jsou tyto struktury detailně popsány v navazujících kapitolách.

2 PIEZOELEKTRICKÉ HARVESTERY

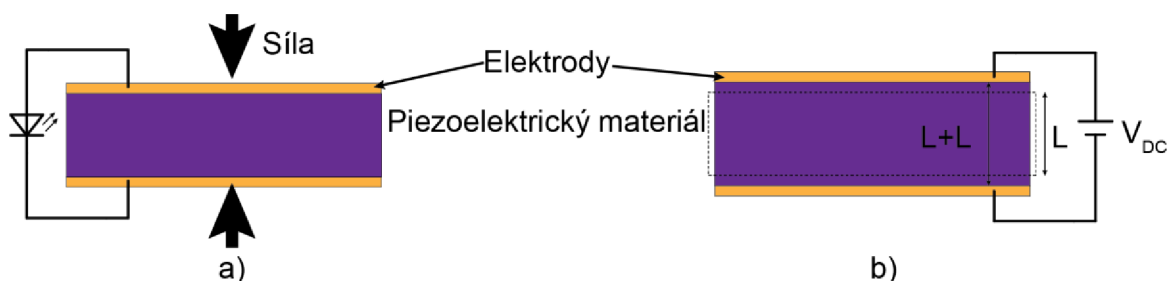
Piezelektrina byla objevena roku 1880 na krystalu křemene bratry Curieovými – od té doby je zkoumána a značně využívána v moderních zařízeních. Jedním z nejznámějších využití piezoelektrického jevu je použití v křemíkových oscilátorech, ze kterých je řízena většina současných elektronických obvodů. PEH slouží k přeměně mechanické energie na elektrickou za použití dvou jevů – přímého piezoelektrického jevu a obráceného piezoelektrického jevu, které jsou popsány v kapitole 2.1. Tyto harvestery se mohou podle jejich velikosti rozdělit do tří skupin:

- Makroskopické
- MEMS
- Nanoelektromechanické (NEMS) systémy

Rozeř PEH určuje jeho klíčové charakteristiky jako je hmotnost, generovaný výkon a technologické metody výroby. S rostoucí velikostí PEH roste i jejich hmotnost a generovaný výkon – ovšem na úkor plochy a pevnosti materiálů. U MEMS/NEMS zařízení se např. naskytuje možnost zkombinovat PEH přímo s výrobou jednoduchého senzoru a jejich umístění do jednoho čipu. Různé aplikace však vyžadují rozdílné požadavky na napájení, stabilitu a časovou stálost. Nelze tedy jednoznačně určit, který z PEH je nejvýhodnější [10].

2.1 Piezoelektrický jev

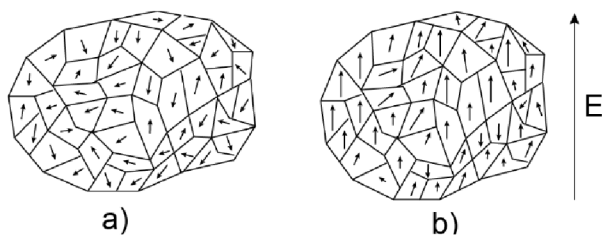
Piezoelektrický jev je lineární vztah mezi elektrickou a mechanickou fyzikální doménou. Na obr. 2.1a je znázorněn princip přímého piezoelektrického jevu, který byl poprvé pozorován bratry Curieovými v roce 1880. Podstata spočívá ve stlačení materiálu, přičemž se přeorientují elektrické dipóly uvnitř materiálu a na vnějších elektrodách vzniká elektrické napětí. O rok později byl díky termodynamickým principům předpovězen i obrácený piezoelektrický jev. Bratři Curieové tento jev experimentálně pozorovali tentýž rok na dlouhých křemenných destičkách s opačnými krystalografickými orientacemi – při přiložení vnějšího napětí dochází k deformaci materiálu (Obr. 2.1b) [14].



Obr. 2.1: Piezoelektrický jev a) přímý, b) obrácený

Pólování je proces, ve kterém dojde k uspořádaní molekulových dipólů uvnitř domén v materiálu (Obr. 2.2) do stejného směru. Tento proces probíhá při vystavení materiálů silnějšímu elektrickému poli, než je koercitivní síla domén v krystalu. Pokud dojde k překročení

Curieho teploty (T_C), která je typická pro každý materiál, dojde k přeuspořádání domén a piezoelektrický jev zaniká [14].



Obr. 2.2: Proces pólování a) před, b) po procesu

Piezoelektrina jakožto vázaný systém dokáže transformovat elektrickou energii na mechanickou a naopak. Lze ji tedy popsat několika různými veličinami: elektrickým polem E , vektorem výchylky D , mechanickým pnutím T a mechanickým natažením S . Tyto veličiny tvoří čtveřici vázaných párů – (T, E) , (S, E) , (T, D) a (S, D) . Každý z těchto párů popisuje piezoelektrický jev párem rovnic a jedním společným piezoelektrickým koeficientem – d , e , g a h . Následující rovnice (2.1) popisující všechny elektro-mechanické páry. Tyto rovnice, z důvodu jednoduššího vysvětlení, jsou zjednodušeny pouze do jednoho rozměru. K popisu reálných materiálů se používají tenzorové tvary [14].

$$\begin{aligned}
 S &= s^E T + dE \\
 D &= \varepsilon^T E + dT \\
 \\
 T &= c^E S - eE \\
 D &= \varepsilon^S E + eS \\
 \\
 S &= s^D T + gD \\
 E &= \beta^T D - gT \\
 \\
 T &= c^D S - hD \\
 E &= \beta^S D - hS
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

V rovnicích se vyskytují členy s^E značící materiálovou kompilační matici za konstantního E a ε^T značící materiálovou dielektrickou konstantu za stálého T .

Napětí generované piezoelektrickým materiálem je závislé na vzdálenosti mezi elektrodami L , napěťovou konstantou g_{ij} , mechanickým pnutím v materiálu σ_{ij} a piezoelektrickou nábojovou konstantou d_{ij} . Výsledné napětí V se poté dá vyjádřit vztahem:

$$\begin{aligned}
 V &= L \sigma_{ij} g_{ij} \\
 g_{ij} &= \frac{d_{ij}}{\varepsilon_r \varepsilon_0}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

2.2 Používané piezoelektrické materiály

Všechny piezoelektrické materiály se vyznačují nízkou krystalovou symetrií, a dochází tak k vytváření dipólů na rozhraní krystalů, které jsou náchylné na vnější elektrické pole. Základní rozdělení piezoelektrických materiálů můžeme brát jako anorganické a organické. Nejpoužívanějšími anorganickými piezoelektrickými materiály jsou materiály na bázi olovo-zirkonátu-titanátu (PZT - $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$), dále bezolovnaté materiály jako nitrid hliníku (AlN), oxid zirkoničitý (ZnO) a bezolovnaté oxidové keramiky jako BaTiO_3 a draselno-sodné niobáty (KNN - $(\text{K}_{0,5}\text{Na}_{0,5})\text{NbO}_3$). Příkladem organického materiálu, které hrají neméně významnou roli ve výzkumu, jsou převážně polyvinylidenfluorid (PVDF) a materiály na bázi celulózy. V tab. 2.1 jsou zobrazeny nejpoužívanější piezoelektrické materiály, jejich typické piezoelektrické konstanty (vysvětleny v kapitole 2.2.1) a vlastnosti.

Tab. 2.1: Piezoelektrické konstanty a materiálové vlastnosti piezoelektrických materiálů[5, 14–18]

Materiál	d_{31} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	ϵ (-)	T_c (°C)	Y (GPa)
PZT	-60,2 ... -274	152 ... 600	1300 ... 3400	193 ... 370	63 ... 130
AlN	1,9 ... 2,4	4 ... 8	10	<2000	200 ... 340
ZnO	--	12,4	11	--	208
BaTiO_3	-79	191 ... 260	1750 ... 1900	120-130	67
KNN	99 ... 219	-20 ... 400	500 ... 1800	292 ... 450	65 ... 115
PVDF	8 ... 22	24 ... 34	10 ... 12	120	1 ... 8,3

2.2.1 Materiálové parametry a konstanty

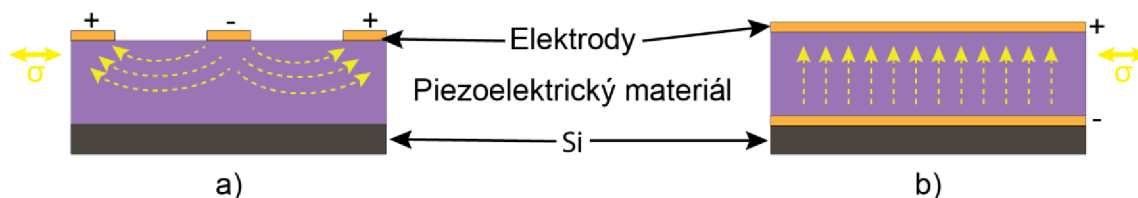
K porovnání materiálových vlastností PEH slouží několik porovnávacích hledisek. Je prakticky nemožné navrhnout jediné unikátní měřítko vlastností, tzv. „figure of merit“ (FoM), jelikož roli v návrhu hrají různé parametry jako je hmotnost, frekvence a geometrie PEH. Dle materiálového rozdělení lze definovat několik takových FoM jako je například elektromechanický člen k , který závisí na tvaru materiálu, polarizační ose, pracovním módu a dalších parametrech.

Běžně používaným FoM je elektromechanický vazební koeficient k_t (rovnice (2.3)), který je definován poměrem piezoelektrického koeficientu e_{31} , poděleného součinem relativní permitivity ϵ_0 a materiálové permitivity ϵ_r . Tento FoM určuje efektivitu přeměny mechanické energie na elektrickou.

$$k_t = \frac{e_{31}^2}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.3)$$

Většina piezoelektrických členů a dalších ukazatelů je silně závislá na směru namáhání materiálu a elektrického buzení materiálu. Z toho důvodu se u všech členů běžně používá notace, která jednoznačně určuje působení těchto polí. Příkladem může být např. piezoelektrický koeficient d_{33} . První číslo udává směr působení elektrické složky, tedy jak je vidět na obr. 2.3, v tomto případě se jedná o osu 3, neboli z . Druhé číslo vyjadřuje směr

mechanického namáhání materiálu. Nejčastěji se jedná o osu rovnoběžnou s osou elektrického buzení (z), nebo osa na ni kolmá – 1 neboli x . Tyto parametry pak určují, v jakém režimu bude dané zařízení kmitat – tloušťkové kmity (d_{33}) nebo podélné kmity (d_{31}). Tento režim lze jednoduše změnit různým návrhem elektrod PEH (Obr. 2.3).

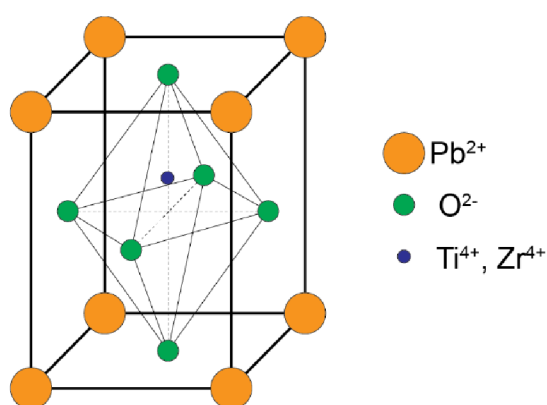


Obr. 2.3: Rozložení elektrod a) interdigitální elektrody budící materiál v módu d_{31} b) paralelní elektrody budící materiál v módu d_{33}

Běžně používaným materiálem pro PEH je PZT, právě díky svým již výše popsaným vlastnostem. Nicméně z hlediska efektivity je neméně důležitým, často opomíjeným materiálem i AlN jehož FoM je srovnatelný nebo může být i vyšší než u PZT [15]. Tato vlastnost dělá z AlN velmi vhodný materiál pro využití v PEH [13].

2.2.2 PZT

Piezoelektrické vlastnosti u tohoto materiálu byly objeveny v roce 1950. PZT patří do skupiny perovskitů, struktura krystalu je znázorněna na obr. 2.4. Jedná se o nejpoužívanější piezoelektrický materiál díky jeho prakticky nepřekonatelným piezoelektrickým vlastnostem. Díky svým feroelektrickým vlastnostem nachází využití v mikroakcelerometrech, mikroaktuátorech, mikrofonech, ultrazvukových převodnících, tiskových hlavách inkoustových tiskáren, EH a dalších zařízeních. PZT však není kompatibilní s CMOS procesem, což se projevuje složitou depozicí a nutností tento materiál pólovat. Další znatelnou nevýhodou je jeho toxicita pro živé organizmy [19].



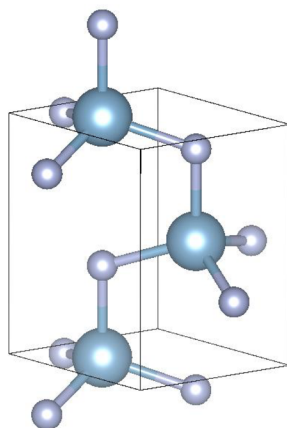
Obr. 2.4: Krystalová struktura PZT

Existuje celá řada derivátů PZT, které se velmi liší svými vlastnostmi. Tvrdé PZT má nízké dielektrické ztráty, malé piezoelektrické koeficienty a velkou tuhost. Měkké PZT má naopak vyšší piezoelektrické koeficienty s velkými ztrátami a menší mechanickou tuhostí [5].

2.2.3 AlN

Typická nitridová sloučenina III.A skupiny periodické tabulky prvků, která již byla prozkoumána pro mnoho použití v MEMS systémech. Typickými aplikacemi jsou vysokofrekvenční filtry, EH, ultrazvukové převodníky a rezonátory. AlN vykazuje výborné fyzikální vlastnosti, jako je vysoká tepelná odolnost (bod tání může dosahovat $\approx 2100\text{ }^\circ\text{C}$), vysoká přenosová rychlost zvuku, chemická stabilita, velká šířka zakázaného pásu ($\approx 6,2\text{ eV}$), nízká ϵ a dobré dielektrické vlastnosti. Piezoelektrický efekt je schopen pracovat až do velmi vysokých teplot (předvedeno do $\approx 1150\text{ }^\circ\text{C}$, teoreticky více jak $2000\text{ }^\circ\text{C}$) [17]. V neposlední řadě je také CMOS kompatibilní a biokompatibilní, což o ostatních materiálech jako je PZT či ZnO nelze tvrdit [15].

Z krystalografického hlediska se jedná o wurtzitovou hexagonální strukturu viz obr. 2.5, která je nejstabilnější za pokojové teploty a vykazuje piezoelektrické vlastnosti. V této struktuře je každý Al atom obklopený čtyřmi atomy dusíku, které formují tetraedr [14, 15].



Obr. 2.5: Krystalová struktura AlN

AlN vykazuje piezoelektrické vlastnosti převážně v ose z – tj. osa kolmá k ose substrátu (001). K dosažení této orientace a vybudování tloušťkových d_{33} kmitů musí být optimalizován proces depozice i správná volba podložní vrstvy. Povrchová hrubost vrstvy a její krystalografická struktura výrazně ovlivňuje kvalitu AlN. Mezi vhodné podložní materiály patří Al (111), Pt (111), Mo (110) a Ti (001).

Z hlediska sběru energie je AlN velmi často zkoumáno a využíváno jako alternativa k PZT, umožňuje totiž získání dostatečné energie z vyšší impedance než PZT, což se promítá do vyššího generovaného napětí.

Relativně nízké piezoelektrické koeficienty AlN lze zvýšit dopováním pomocí Sc nebo MgZr. Bylo dokázáno [20], že dopováním lze několikanásobně vylepšit piezoelektrické vlastnosti. Přidáním Sc dochází ke zvýšení piezoelektrických koeficientů d_{33} ze $\approx 7\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$ až na $\approx 30\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$. Na příkladu bylo ukázáno zvětšení generovaného výkonu ze $70\text{ }\mu\text{W}$ na $350\text{ }\mu\text{W}$ při ideálních podmínkách [15, 20].

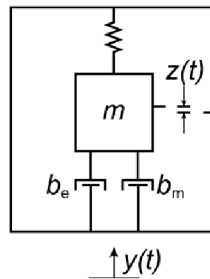
2.2.4 PVDF

Polymer složený z CH_2CH_2 molekul, která se opakují v lineárním řetězci. Jedná se o polykrytalickou látku (krystaly obklopené amorfni fází). Vyskytuje se v několika fázích (alfa, beta, gama, delta), z nichž nejsilnější piezoelektrický jev vykazuje beta fáze. K dostání beta fáze je nutno tento materiál mechanicky napnout a elektricky přepólovat, aby došlo k přeskupení molekul z ne-piezoelektrické alfa fáze.

Ke zvýšení množství krystalové části v beta fázi jsou přidávány kopolymery, nejčastěji triflouretylen – CF_2CFH , jehož struktura je totožná s PVDF. Pouze jeden vodíkový atom je nahrazen flórem. Tento přídatek je schopen zvýšit množství krystalů v látce až na 90% a výrazně tak vylepšit její piezoelektrické vlastnosti [14].

2.3 Náhradní model PEH

K popisu PEH se používá mechanický model (Obr. 2.6), který se skládá ze závaží m , pružiny k a tlumení b . Jelikož je piezoelektrina vázaný systémů dvou veličin, vyskytují se v modelu dva typy tlumení – elektrické b_e a mechanické b_m . Konverze kinetické energie na elektrickou je v tomto modelu chápána jako ztráty na elektrickém tlumení [13]. Tento model dokáže přesně modelovat elektromagnetické chování PEH pouze, pokud je tlumení a tuhost systému lineární.



Obr. 2.6: Mechanický model PEH

V reálných podmínkách však není konverzní mechanismus lineární a model není přesný. I přesto v něm lze vyzorovat principy, dle kterých se PEH chovají. Konvertovaný výkon P lze definovat pomocí b_e jako:

$$P = \frac{1}{2} b_e z^2 \quad (2.4)$$

Je předpokládáno, že aplikované buzení je sinusové, ve tvaru $y = Y \cos \omega t$. Analytické vyjádření předchozí rovnice (2.4) je pak dáno:

$$|P| = \frac{m \zeta_e \omega_n Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4 \omega^2}{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2(\zeta_e + \zeta_m) \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^2} \quad (2.5)$$

Kde ζ_e a ζ_m jsou elektrické a mechanické tlumení dané vzorci $\zeta_e = b_e/2m\omega_n$ a $\zeta_m = b_m/2m\omega_n$. ω je pak uhlová frekvence, ω_n je rezonanční frekvence systému ($f_r = \omega_n/2\pi$) a m je hmotnost

PEH. Pokud je budicí frekvence souhlasná s rezonanční frekvencí systému, lze rovnici (2.5) přepsat jako:

$$|P| = \frac{\zeta_e}{4\omega_n(\zeta_e + \zeta_m)^2} mA^2, \quad (2.6)$$

kde A je zrychlení vstupní síly a je dáno $A = \omega^2 Y$. Elektrické tlumení ζ_e lze také vypočítat dle vztahu:

$$\zeta_e = \frac{\omega_n k_p^2}{2 \sqrt{\omega_n^2 + \left(\frac{1}{RC_p}\right)^2}}, \quad (2.7)$$

kde k_p je elektromechanický koeficient definovaný Youngovým modulem, piezoelektrickou konstantou d a permitivitou materiálu ϵ_r . R je zátěžový rezistor a C_p je celková kapacita převodníku [13].

Z těchto rovnic lze usoudit, že PEH bude dodávat nejvyšší výkon při rezonanci, jelikož bude docházet k nejvyšším výchylkám a protahování piezoelektrického materiálu. Velikost maximálního výstupního výkonu je tedy limitována celkovým tlumením PEH. Celkové tlumení je definováno jako součet mechanického a elektrického ($\zeta_T = \zeta_m + \zeta_e$). Snížením celkového tlumení tedy roste velikost generovaného výkonu, a zároveň ale klesá jeho frekvenční rozsah, ve kterém je PEH schopen efektivně pracovat. K porovnání tohoto jevu složí tzv. Q-faktor, který je inverzní k celkovému tlumení – $Q = 1/2\zeta_T$. Frekvenční rozsah je pak dán jako $\Delta\omega = \omega_n/Q$ [13].

PEH s vyšším mechanickým tlumením, než s elektrickým tlumením ($\zeta_m > \zeta_e$), může být omezen ve výstupním výkonu. Je proto nutné navrhnout PEH tak, aby tento výkon byl co nejvyšší a mechanické tlumení bylo na nejnižší možné úrovni. Elektrické tlumení tomu pak musí být následně přizpůsobeno. Musí tedy platit $\zeta_m = \zeta_e$. Posledním faktorem ovlivňujícím generovaný výkon, jak je vidět z rovnice (2.6), je hmotnost závaží PEH. S rostoucí hmotností roste i výkon. Z tohoto důvodu by hmotnost závaží měla být maximalizována.

2.4 Řídicí obvody pro PEH

Důležitou roli v množství generovaného výkonu hraje i usměrňovací obvod, díky němuž je generované napětí PEH převáděno na elektrickou energii. Obvody můžeme rozdělit do tří kategorií dle typu použitých součástek na: rezistivní, usměrňovací a aktivní. Barth a kol. udává příklad využití aktivního obvodu, který udává téměř dvojnásobné zvýšení generovaného výkonu při použití aktivní metody oproti klasickému diodovému usměrňovači. Z elektrického pohledu lze PEH modelovat jako zdroj proudu I_P s paralelní kapacitou C_P [20].

2.4.1 Rezistivní obvody

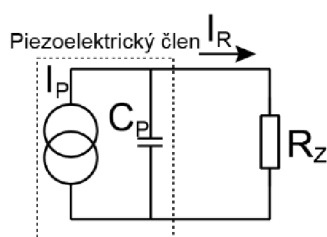
Nejjednodušším zapojením je připojení rezistorové zátěže přímo k výstupu PEH (Obr. 2.7). Proud z piezoelektrického členu (PC) lze vyjádřit jako $I_P = I_0 \cdot \sin(\omega t)$. Celkový náboj Q_T za jednu půl periodu ($T/2$) tedy získáme z:

$$Q_T = \int_0^T I_0 \omega t dt = \frac{2I_0}{\omega} \quad (2.8)$$

Pokud uvažujeme, že PČ operuje v režimu naprázdno, všechny generovaný náboj odteče to C_P . Pokud k PČ připojíme rezistor R_Z , proud poteče skrz něj. Výkon na impedančně přizpůsobeném R_Z je pak dán:

$$P_{R(Max)} = \frac{I_0^2}{4\omega C_P} \quad (2.9)$$

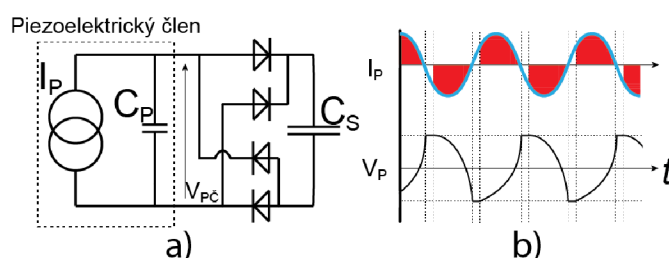
Tato metoda však není příliš vhodná k získávání elektrické energie, jelikož většina zařízení potřebuje k práci stejnosměrné napájení [21].



Obr. 2.7: Piezoelektrický člen s rezistivní zátěží

2.4.2 Usměrňovací obvody

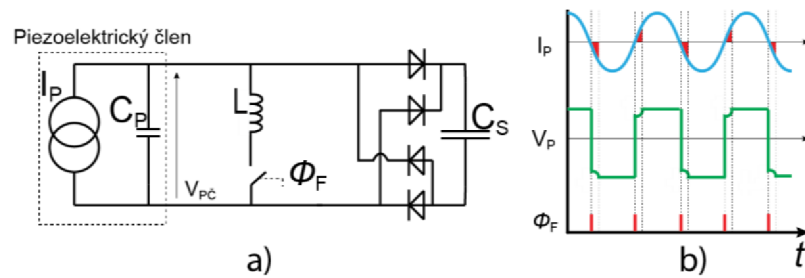
K dosažení stejnosměrného zdroje energie se využívá klasických můstkových usměrňovacích obvodů (Obr. 2.8). Aby došlo k přenesení energie z PČ musí se nejprve překonat závěrné napětí usměrňovacího můstku. Napětí na piezoelektrickém členu ($V_{PČ}$) musí být $\pm (V_S + 2V_D)$ pro obě půlvlny. V_S je napětí na úložném kapacitoru C_S a V_D je napětí na diodě v propustném směru. Každou půlperiodu napětí na PČ se obrátí polarita. Z toho důvodu je část energie ztracena pouze na překlápění. Červené oblasti na obr. 2.8 ilustrují ztracenou energii. Pro správnou funkci musí napětí na PČ splňovat podmínku: $V_{OC} > V_S + 2V_D$, kde V_{OC} je napětí naprázdno na PČ. V případě nedodržení uvedené podmínky bude veškerá energie ztracena na usměrňovači.



Obr. 2.8: a) zapojení usměrňujícího obvodu, b) časové průběhy I_P a $V_{PČ}$ v čase

2.4.3 Aktivní obvody

Teorie získávání energie ukazuje, že pokud chceme získat nejvyšší možný generovaný výkon, musí být generované napětí také nejvyšší a ve fázi s obvodem. K tomu slouží aktivní obvody, které se zakládají na aktivní změně napětí na elektrodách piezoelektrického členu. Příkladem takové techniky je např. synchronizované spínání harvesteru na indukčnosti (SSHI). SSHI je technika, která přidává do obvodu element indukčnosti L a tvoří tak RLC obvod (Obr. 2.9). Princip spočívá v generování krátkého pulzu Φ_F pokaždé, když I_P projde nulou, čímž se uzavře obvod. Tato metoda pomáhá minimalizovat ztráty při překlápění. Průběhy proudu a napětí jsou ilustrovány na obr. 2.9. Červeně je vyznačena nevyužitá energie [21, 22].



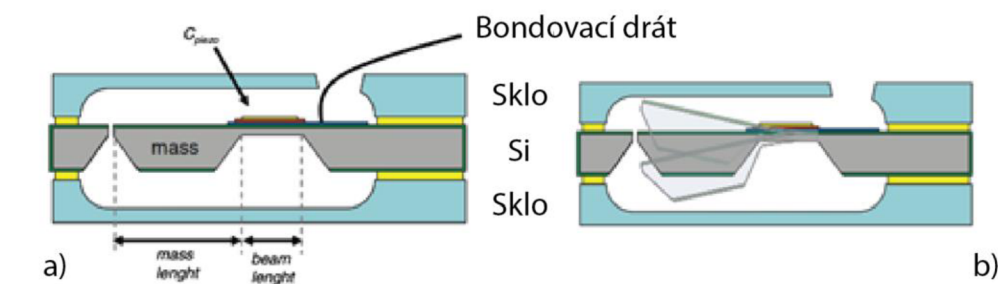
Obr. 2.9: a) Zapojení SSHI obvodu, b) časové průběhy I_P , V_P a Φ_F

3 SOUČASNÁ ŘEŠENÍ A VÝZKUM PEH

V této části jsou uvedeny příklady publikovaných PEH. Hlavní motivací je seznámení se s výrobními postupy, použitými materiály, strukturou PEH a charakterizací zařízení z hlediska maximálního generovaného výkonu (P_{Max}) při konkrétních rezonančních frekvencích. Uvedené procesy, jako jsou například depoziční a mikro-obráběcí techniky, jsou detailněji popsány v mojí bakalářské práci, která se zabývala výrobou, simulacemi a charakterizací piezoelektrických rezonátorů [23].

3.1 PEH na bázi AlN

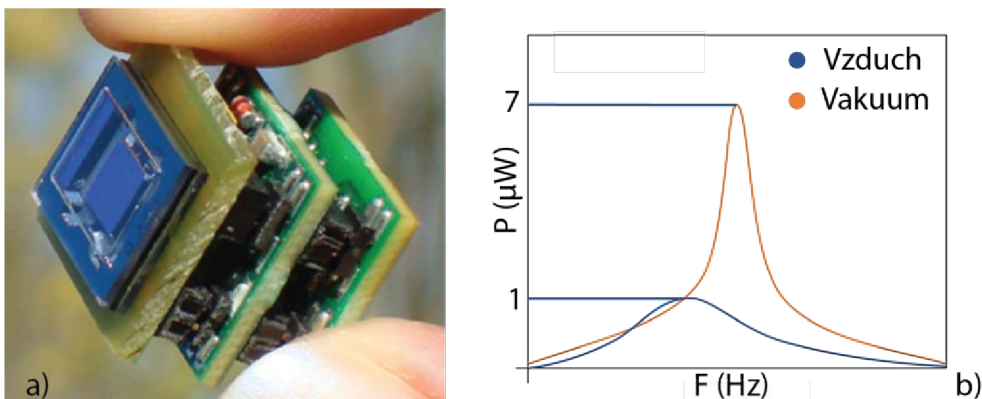
Elfrink a kol. demonstrovali výrobu a zapouzdření PEH o několika různých rozměrech. Nejvyššího generovaného výkonu bylo dosaženo u nezapouzdřeného zařízení s rozměry $6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Hodnota P_{Max} dosahovala $60 \mu\text{W}$ při frekvenci 572 Hz a zrychlení $19,62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. K výrobě byl použit Si (100) wafer s pasivačními vrstvami Si_3N_4 a SiO_2 . Ke generování náboje byla vyrobena sendvičová struktura Pt/AlN/Al. Tyto vrstvy byly vytvarovány pomocí suchého reaktivního leptání (RIE). PEH byl mechanicky uvolněn ze zadní strany pomocí mokrého leptání Si v KOH. Takto uvolněný PEH byl následně zapouzdřen mezi dva skleněné wafery, výsledná struktura je znázorněna na obr. 3.1 [24].



Obr. 3.1: a) 2D řez strukturou PEH, b) znázornění pohybu PEH uvnitř pouzdra [24]

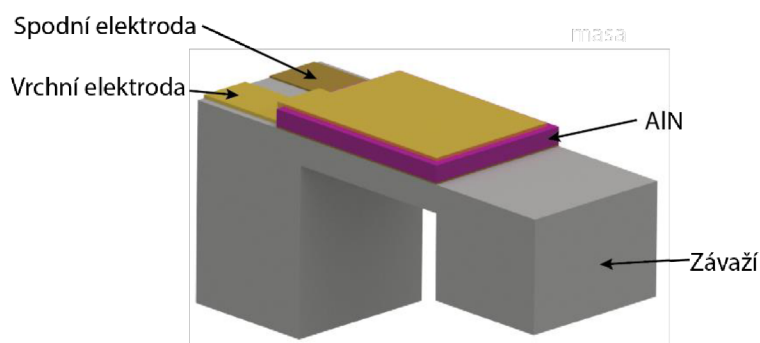
Je poukázáno na to, že pokud je PEH zapouzdřen, dosahuje mnohem nižších výkonových hodnot, což je v tomto případě pravděpodobně způsobeno špatným návrhem pouzdra. Špatně zkonstruované pouzdro omezuje pohyb PEH a tím dochází k vyššímu mechanickému tlumení. Pro příklad bylo uvedeno, že v případě zapouzdření stejného zařízení bylo dosaženo výkonu pouze $2,1 \mu\text{W}$ [24].

Příkladem konkrétního využití je integrace vakuově zapouzdřeného PEH do autonomního senzoru teploty (Obr. 3.2). PEH byl buzen na vibračním stolku o konstantní frekvenci 353 Hz se zrychlením $6,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Při těchto podmínkách systém generuje $17 \mu\text{W}$ do optimalizované zátěže. Výrobní postup je stejný jako v předchozím případě, pouze s tím rozdílem, že skleněné wafery byly spojeny ve vakuu a PEH tak pracuje v prostředí se sníženým tlakem. To výrazně zvyšuje jeho Q a P_{Max} . Při porovnání P_{Max} zapouzdřeného PEH a nezapouzdřeného je vidět přibližně čtyřnásobné zvýšení P_{Max} v případě vakuově zapouzdřeného zařízení. Ke spojení byl použit fotorezist SU-8, který není vakuově stálý a postupem času dochází k propouštění plynů z okolní atmosféry dovnitř pouzdra. Autor navrhnul použití kovového eutektického spoje k eliminaci tohoto efektu [25].



Obr. 3.2: a) Vyrobený PEH se senzorem teploty a řídicími obvody, b) znázornění závislosti P_{Max} na velikosti vakua [25]

Dalším příkladem PEH na bázi AlN je harvester vyrobený na oboustranně leštěném Si (100) waferu (Obr. 3.3). Na substrát byly postupně nadeponovány vrstvy $\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{AlN}/\text{Al}$. K vytváření struktury z horní strany bylo použito lift-off procesu a RIE. Finálním krokem výroby bylo vyleptání Si ze spodní strany pomocí DRIE. Takto vyrobené struktury dosahovaly maximálního výstupního výkonu $34,78 \mu\text{W}$ při 572 Hz a $10 \mu\text{W}$ při 168 Hz. Pro testování obou frekvencí bylo použito zrychlení $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ [26].

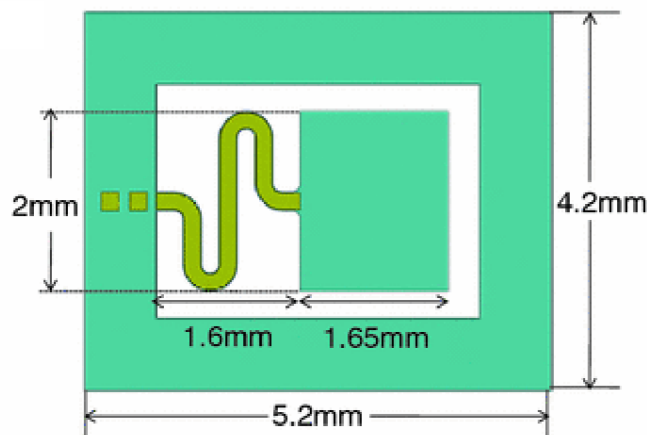


Obr. 3.3: 3D model navrhovaného PEH [26]

Podobný koncept PEH realizoval Ricart a kol. ve větších rozměrech. Plocha zařízení byla 5 cm^2 a hodnoty P_{Max} dosahovaly přes $100 \mu\text{W}$ při rezonančních frekvenci 155 Hz a zrychlení $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tato hodnota se řadí k nejvyšším doposud publikovaným. PEH je realizovaný na Si waferu o tloušťce $725 \mu\text{m}$. Na povrch waferu byly nadeponovány vrstvy $\text{Mo}/\text{AlN}/\text{Al}$. Na zadní stranu byl nadeponován Al, který sloužil jako pevná maska proti DRIE leptání Boschovým procesem [27].

3.2 PEH na bázi PZT

Snížení rezonančních frekvencí je možné dosáhnout několika způsoby, jedním z nich je snížení tuhosti pružiny k v modelu PEH. Liu et al. navrhli nový design PEH do tvaru S (Obr. 3.4). První částí výroby byla depozice $\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{Ti}/\text{PZT}/\text{Ti}/\text{Pt}$ na SOI wafer. Kovové vrstvy byly připraveny magnetronovým naprašováním. PZT bylo nanášeno sol-gel technikou. Leptání kovových vrstev probíhalo metodou iontové odprašování pomocí Ar^+ iontů. PZT bylo vyleptáno v roztoku HF , HNO_3 a HCl . Mechanické uvolnění PEH proběhlo ze zadní strany pomocí DRIE. Tento PEH pracuje na rezonanční frekvenci 27,1 Hz a se zrychlením $\approx 0,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ dosahoval $P_{\text{Max}} = 1.117 \text{ nW}$ [28].



Obr. 3.4: Struktura PEH ve tvaru S, horní pohled

PEH na bázi PZT lze vyrobit i CMOS kompatibilním procesem. Jedná se o spojení předem připraveného, komerčně dostupného PZT plátku s Si waferem. Výrobní proces začíná vyleptáním prohlubně do Si pomocí DRIE s následnou depozicí SiO_2 a několika vrstev bondovacího materiálu $\text{Au}/\text{In}/\text{Au}/\text{Cr}$. Do pomocného waferu jsou také vyleptány prohlubně a je umístěno PZT. Tento wafer je následně přenesen na předem připravený wafer. Poté jsou oba waferu spojeny při teplotě $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Následuje odbroušení (lapování) pomocného waferu s PZT částí, aby došlo k jeho ztenčení. Dalším krokem je depozice a vytvarování parylenu k elektrickému oddělení horní elektrody od PZT. Na vrstvu parylenu je poté deponována vrchní Au elektroda. Takto připravený wafer je ze zadní strany odleptán pomocí DRIE [29].

Výsledný PEH dosahuje maximálního generovaného výkonu $0,15 \text{ } \mu\text{W}$ při 263 Hz a zrychlení $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Při zrychlení $\approx 19.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ je PEH schopen generovat $10,2 \text{ } \mu\text{W}$ při 252 Hz [29].

3.3 PEH na bázi dalších piezoelektrických materiálů

V nano měřítku je velmi oblíbeným materiálem ZnO, díky jeho schopnosti tvořit nano-drátky (ND). Bylo ukázáno, že pole těchto ND je schopno generovat napětí dosahující hodnot až $\approx 58 \text{ V}$ při nárazovém namáhání struktur. Nejedná se však o rezonanční systém, ale pouze o piezoelektrický, a tudíž není příliš vhodné jej porovnávat s ostatními uvedenými PEH. K ověření funkčnosti generátoru byly stimulovány nervy žabí nohy a jako zdroj síly byly

použity údery lidské ruky [30].

ND byly vyrobeny na Si waferu, na který byl naprášen oxid indio-cínatý (ITO). ITO je elektricky vodivý materiál a slouží jako spodní elektroda. Následovala depozice zárodečné vrstvy ZnO. Litografickým procesem byla vytvořena okna, ve kterých hydrotermální metodou byly narosteny ZnO ND. Jako ochranná vrstva byl nanesen polymethylmethakrylát (PMMA), následován vrchní Al elektrodou. Zapouzdření bylo realizováno další vrstvou PMMA [30].

3.4 Porovnání dosažených výsledků

Literatura obsahuje nepřehledné množství dalších PEH. Srovnání parametrů popsanych v této práci obsahuje následující tab. 3.1.

Tab. 3.1: Srovnání parametrů PEH

Materiál	aktivní plocha	Normalizovaný P_{Max} ($\mu W \cdot s^2 \cdot m^{-1}$)	f_r (Hz)	ref
AlN	<1 cm ²	2,7	353	[24]
AlN	31,4 cm ²	1,8	572	[26]
AlN	4,68 cm ²	51	155	[27]
PZT	6,5 mm ²	0,31	<30	[28]
PZT	25 mm ²	0,15	263	[29]

Z tabulky je patrné, že dosažené hodnoty P_{Max} se velmi liší. Nelze tak přesně určit, který z přístupů autorů vede k nejlepším výsledkům. Větší plocha PEH neznamená vždy vyšší dosažený výkon, jak je vidět dle normalizovaného P_{Max} . Všechny porovnávané PEH se markantně lišily ve svých vlastnostech a není tedy zcela vhodné je porovnávat mezi sebou. Velkou roli ve výsledných číslech také hraje použitý řídicí obvod, který dokáže mnohonásobně vylepšit P_{Max} . Je nad rámec této práce připravit obsáhlejší přehled dosažených výsledků, vzhledem k enormnímu a stále se zvyšujícímu počtu publikací věnujících se tomuto tématu. Každý z uvedených článků byl určen k jinému výzkumu chování PEH. Jako celek přináší tento výběr literatury přehled principů výroby a chování různých PEH.

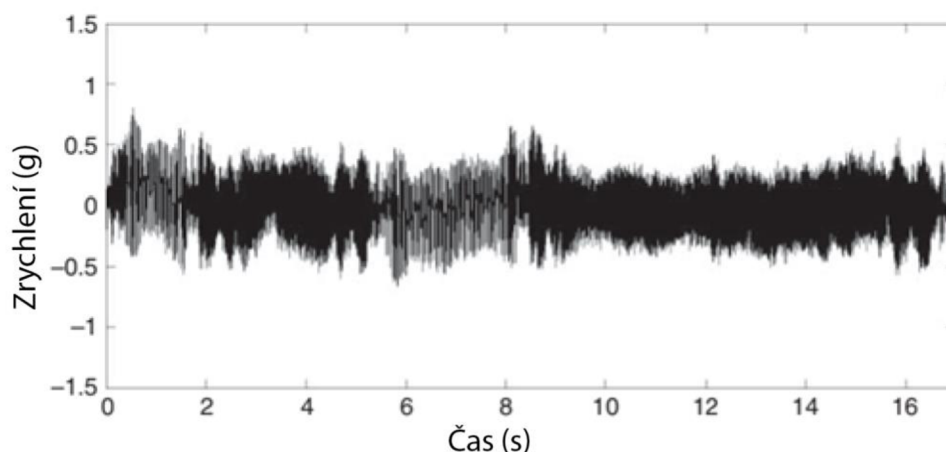
4 SIMULACE A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Z výše popsaných vlastností se naskýtají dvě možnosti návrhu PEH. První je PEH s vysokým Q , a tudíž vysokým generovaným výkonem, ale naproti tomu velmi vysokou citlivostí na přesnost budící frekvence. Druhou možností je návrh PEH s nízkým Q , širším $\Delta\omega$ a nižším P_{Max} . V tab. 4.1 jsou zobrazeny typické frekvence vyskytující se v prostředí a amplituda jejich zrychlení. Z tabulky je patrné, že téměř všechny druhy vibrací nedosahují zrychlení $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Charakterizace PEH vyšší hodnotou tedy není vypovídající o skutečné hodnotě generovaného výkonu v reálných podmínkách.

Tab. 4.1: Přehled vybraných vibračních zdrojů, jejich frekvencí a hodnotě zrychlení

Zdroj vibrací	Zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Frekvence (Hz)
Přístrojová deska v autě	3	13
Motor auta	12	200
Lednice	0,1	240
Mikrovlnná trouba	2,5	121
Lidská chůze	2-3	1
CD mechanika	0,6	75

Na obr. 4.1 je zobrazen časový průběh vibrací z kapoty auta, na kterém je vidět čistě nahodilý charakter vibrací. Z tohoto důvodu je obtížné navrhnout PEH s vysokým Q , který by se přesně rozkmital a následně sledoval danou budící frekvenci [5].



Obr. 4.1: Časový průběh vibrací z kapoty auta [13]

4.1 Simulace a charakterizace testovacích struktur

Pro zjištění chování budoucích PEH, byly nejprve provedeny fyzikální simulace v programu ANSYS Workbench 19.2. Simulace slouží k předpovězení chování struktur, rezonančních frekvencí a velikosti namáhání materiálů.

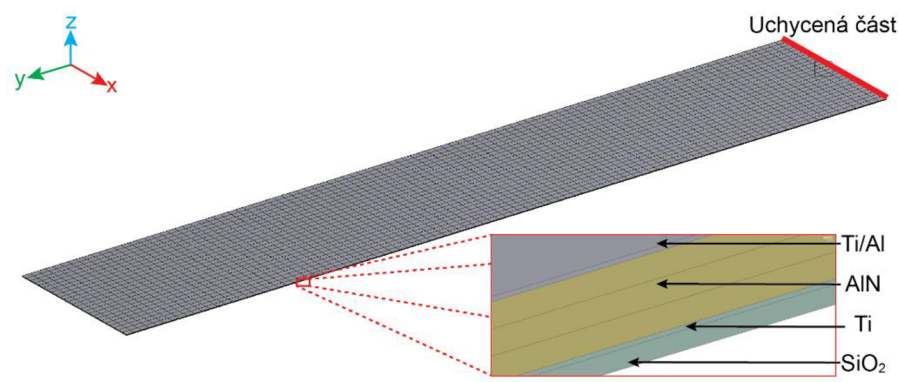
ANSYS pracuje s metodou konečných prvků. Základním principem této metody je rozdělení objemu (zasíťování) tělesa na definované menší prvky – elementy. Pro každou takto definovanou část se posléze vypočte sada diferenciálních rovnic, dle zadaných počátečních podmínek. Tyto rovnice jsou pak zohledněny v celém měřítku tělesa a dostáváme tak ucelený obraz toho, jak se těleso bude chovat za definovaných podmínek.

ANSYS Workbench je grafické prostředí skrývající v pozadí skriptovací jazyk ANSYS Parametric Design Language (APDL). Mezi výhody práce v grafickém prostředí patří lepší integrace s 3D modelovacími programy, relativně jednoduchá obsluha programu a rychlejší práce pro jednoduché simulace. Hlavní nevýhodou, především pro pokročilé multifyzikální simulace, je velmi obtížné a někdy i nemožné řešení jistých úloh bez použití rozšiřujících nástrojů a doplňků. Řešením tohoto jsou tzv. Command Snippets (CS), což jsou bloky APDL kódu, které lze vložit do grafického prostředí a zpřístupnit tím veškeré funkce klasického ANSYSu. Díky těmto úryvkům kódu lze relativně snadno zkombinovat přístup obou cest – grafického rozhraní a programovacího jazyku APDL.

CS lze vložit přímo do stromu grafického prostředí. Z hlediska simulací je možné je umístit do tří lokací:

- 1) před analýzu – tzv. preprocessor – CS v této části slouží k nastavení materiálových vlastností, volbě elementů a dalším úkonům, které jsou nutné před zahájením simulace
- 2) vlastní analýza – zde se mohou nastavit vlastnosti prováděné analýzy, vložit počáteční podmínky, které nejsou přístupné v grafickém prostředí a další.
- 3) výsledky – tzv. postprocessor – tato část slouží k manipulaci s vypočtenými daty, zobrazení průběhů a vyhodnocení vlastních proměnných.

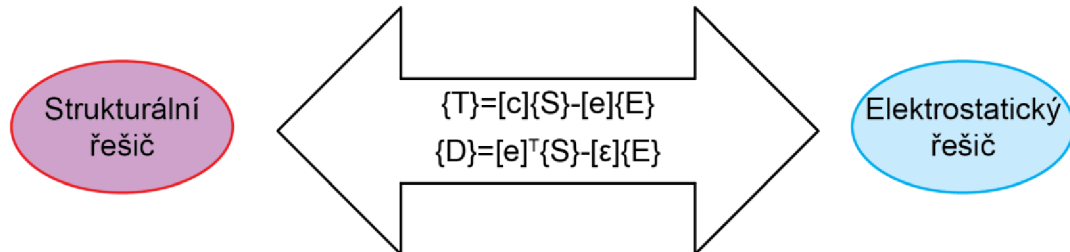
K ověření správnosti modelu, budou nejprve simulace provedeny na jednoduchých jednostranně vetknutých nosnících, které mohou sloužit jako jednoduché PEH. Uchycení modelu a jeho síť (mesh) je znázorněna na obr. 4.2. Tento model i hotovou strukturu lze v budoucnu jednoduše rozšířit umístěním závaží z těžkého prvku (Au, W, Ni) na volný konec.



Obr. 4.2: Struktura PEH včetně detailu popisující rozložení vrstev

4.1.1 Piezoelektrická analýza

Tento typ analýzy je v ANSYSu řešen pomocí piezoelektrické matice e , která spojuje kvazi-elektrostatickou analýzu se strukturální (Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Spojení kvazi-statické a elektrostatické analýzy přes piezoelektrickou matici e

Matice $[c]$ je vložena v definici materiálu ANSYSu. Jelikož ANSYS neumožňuje přímo zadávat piezoelektrické konstanty, musí být piezoelektrická matice $[e]$ a matice permitivity $[\varepsilon]$ definovány v piezoelektrickém modulu pro preprocessor.

$$\begin{aligned}
 [c] &= \begin{bmatrix} 3,45 & 1,25 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,25 & 3,45 & 1,20 & 0 & 0 & 0 \\ 1,20 & 1,20 & 3,95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,10 \end{bmatrix} [10^{11}Pa] \\
 [e] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0,48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,48 & 0 & 0 \\ -0,58 & -0,58 & 1,55 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [C/m^2] \\
 [\varepsilon] &= \begin{bmatrix} 8,0 & 0 & 0 \\ 0 & 8,0 & 0 \\ 0 & 0 & 9,5 \end{bmatrix} [10^{-11}F/m]
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.1.2 Modální analýza

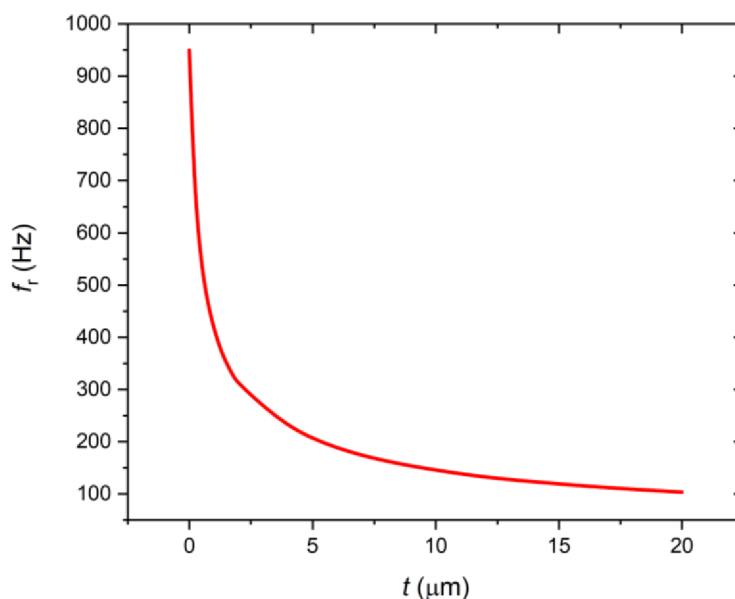
Výchozí metodou pro zjištění rezonančních frekvencí struktur je modální analýza. K ověření přesnosti modelu jsou porovnány výsledky modální analýzy se změřenými výsledky skutečných struktur. K měření byly využity struktury vyrobené při bakalářské práci. Charakterizace vyrobených struktur probíhala na impedančním analyzátoru E4990A (Keysight), lock-in zesilovači MFLI (Zürich Instruments) a pomocí interferometrického měření (popsáno v kap. 6) na Ústavu přístrojové techniky Akademie Věd ČR. Měření probíhalo na laseru s vlnovou délkou 530 nm. Porovnání modální analýzy s výsledky interferometrického měření udává tab. 4.2.

Tab. 4.2: Porovnání výsledků modální analýzy s výsledky měření

Metoda	f_r			
	1. (Hz)	2. (Hz)	3. (Hz)	4. (Hz)
-				
E4990A	964	6458	13528	18647
MFLI	953	6329	12876	18879
Interferometr	970	6390	12900	18800
Simulace	950	6054	7830	17009

Nepřesnosti (hlavně u 3. f_r) jsou pravděpodobně způsobeny nepřesným geometrickým modelem, který přesně nezobrazuje odchylky od ideálního (simulovaného) tvaru, vzniklé při výrobě struktur. Jedním z hlavních faktorů může být pevné uchycení PEH na jedné straně, kdy u reálné součástky dochází k tlumení rezonanční frekvence vlivem okolí struktury. Tato nepřesnost však není příliš velká a korekce modelu dle reálné struktury by do analýzy přinášela prozatím zbytečnou komplexnost.

Další simulací je ukázáno, jak se mění f_r , pokud je na volném konci umístěno závaží. V simulaci byl zvolen wolfram o různých tloušťkách (0–20) μm . Jak je vidět na obr. 4.4, přidáním i velmi malé hmoty na volný konec dochází k rapidnímu poklesu f_r . Naopak při tloušťce materiálu v rozmezí 10 μm až 20 μm dochází ke změně f_r jen velmi nepatrně v řádu desítek Hz. Při 10 μm je $f_r = 145$ Hz, což je $6,5\times$ méně než pro jednostranně vetknutý nosník bez zátěže.

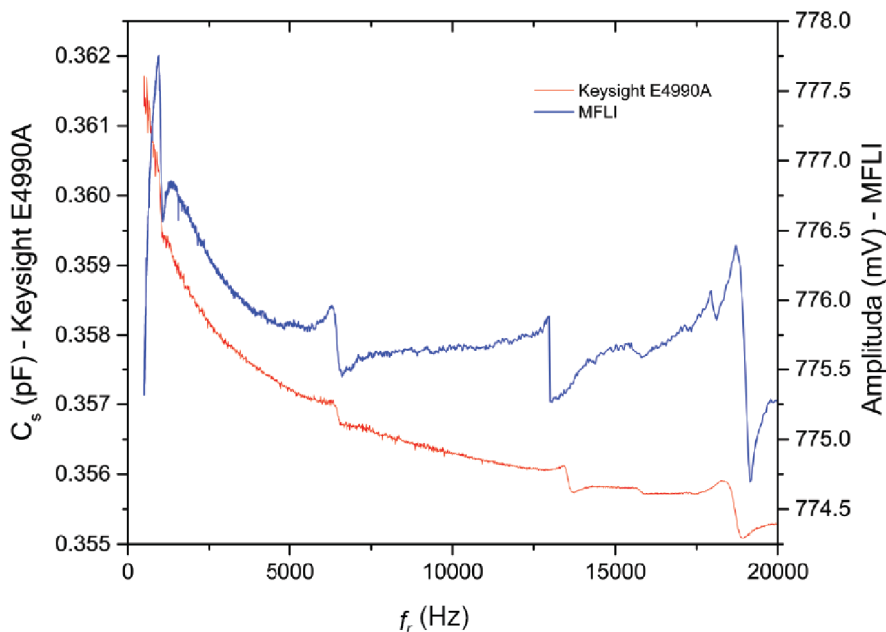


Obr. 4.4: Závislost f_r na tloušťce závaží na konci jednostranně vetknutého nosníku

4.1.3 Harmonická analýza

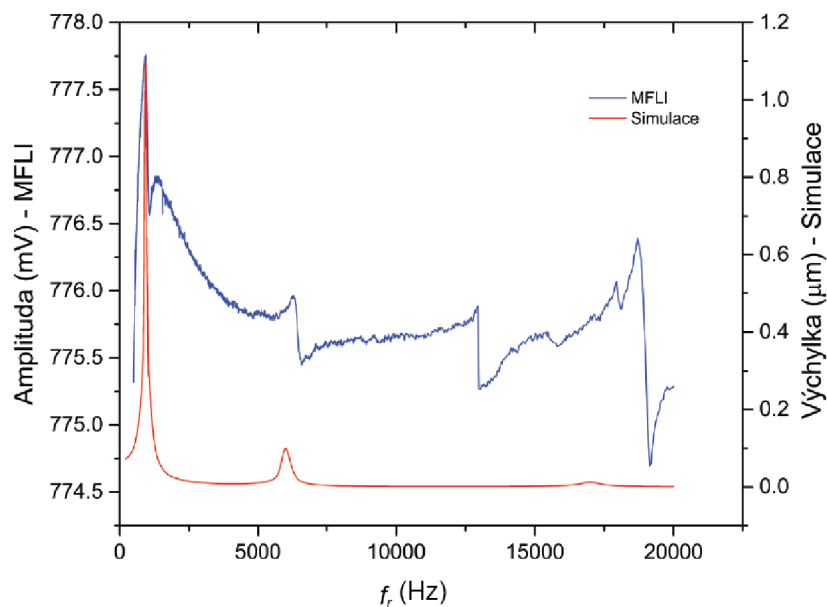
Protože není možné určit velikost výchylky z modální analýzy, slouží k tomuto účelu harmonická analýza, kdy je struktura vystavena harmonickému sinusovému signálu o definované amplitudě. Rozmítání frekvence probíhalo v rozmezí (100–20000) Hz. Z výsledků je znát jistý posun f_r oproti modální analýze. Na obr. 4.5 lze také vidět porovnání s naměřenými

hodnotami na impedančním analyzáru a lock-in zesilovači, toto měření slouží pouze k porovnání f_r mezi přístroji.



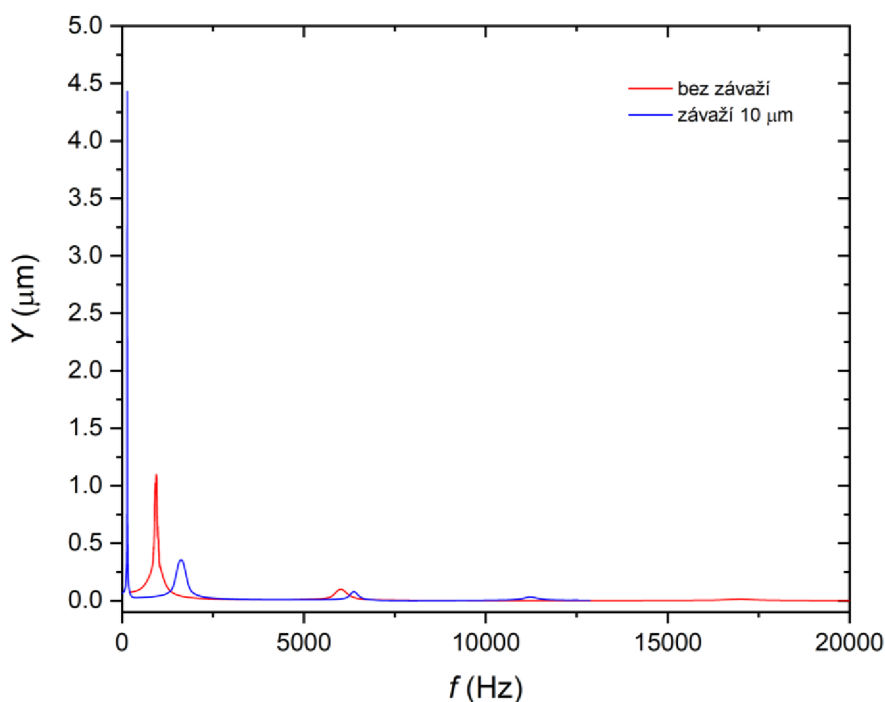
Obr. 4.5: Porovnání naměřených hodnot rezonančních frekvencí, červenou barvou je měřená kapacita pro Keysight E4990A, modrou barvou je měřené napětí na vstupu zesilovače MFLI

Jak je vidět z grafu, tak všechny f_r jsou lehce posunuty od sebe. V případě měření kapacity je první f_r zabalená v šumu měření. Další rezonance jsou pak mezi sebou mírně posunuty.



Obr. 4.6: Porovnání naměřených průběhů mezi simulací a zesilovačem MFLI

Na obr. 4.6 jsou porovnány průběhy mezi simulací a zesilovačem MFLI. Můžeme si všimnout, že simulované rezonanční frekvence až na drobné odchylky souhlasí s naměřenými. Jediným vrcholkem, který se v simulaci neprojevil je $3 \cdot f_r$, to je způsobeno pravděpodobně tím, že v simulaci sledujeme výchylku v ose z , ale třetí mód je torzní. To znamená, že v ose z se jeho výchylka projeví jen nepatrně. Další analýzou bylo porovnání výchylek v harmonické analýze PEH se závažím a bez (Obr. 4.7). Vliv závaží se neprojevuje pouze snížením f_r ale také razantním zvýšením výchylky PEH.



Obr. 4.7: Harmonická analýza PEH bez závaží a se závažím o tloušťce 10 μm

Harmonická analýza dokáže určit velikosti pnutí a natahování materiálu. Maximální protažení nastává při první $f_r = 950$ Hz. K určení natažení byl použit výsledkový modul Equivalent Elastic Strain (von-Mises). Velikost natažení při první rezonanční frekvenci činí $3,6 \cdot 10^{-6}$ m/m. Velikost mechanického pnutí nepřekročila hodnotu $8,5 \cdot 10^5$ Pa. Pro případ s W závažím o tloušťce 10 μm jsou hodnoty pnutí $1,9 \cdot 10^6$ Pa a natažení $2,05 \cdot 10^{-5}$ m/m. Dle zákona pružnosti víme o použitých materiálech, že jejich mez pružnosti je řádově vyšší. Struktura se tedy pod vlastní tíhou nezlomí, nebo jinak nepoškodí.

4.2 Simulace navržených PEH

Před výrobou samostatných PEH bylo vhodné provést fyzikální simulace dle navrhovaného modelu, abychom si předem ověřili předpokládané f_r . Dle předchozích simulací lze již vycházet z ověřeného modelu. V případě, že by rezonance neodpovídali požadovaným hodnotám je vhodné upravit design struktur ještě před zahájením výroby.

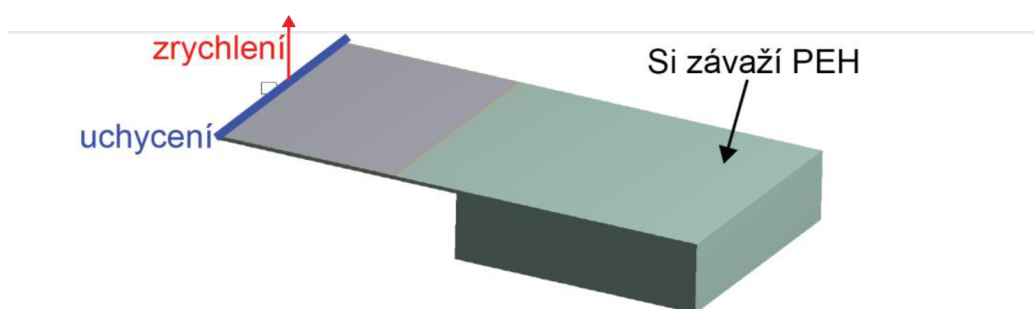
K definici piezoelektrického materiálu může být využito CS v ANSYS Workbench. Jelikož výchozím elementem pro modální analýzu je SOLID186, krátkým kódem vloženým do preprocesoru můžeme změnit element na SOLID226, který podporuje piezoelektrickou

analýzu. Tento element obsahuje 20 uzlů, přičemž každý uzel můžeme nadefinovat až pěti stupni volnosti. Jedním z požadovaných stupňů volnosti pro piezoelektrickou analýzu je „Volt“, který umožňuje provádět piezoelektrickou analýzu v těchto modulech: Statická analýza, modální, harmonická a přechodová harmonická.

4.2.1 Modální analýza PEH v závislosti na velikosti struktury

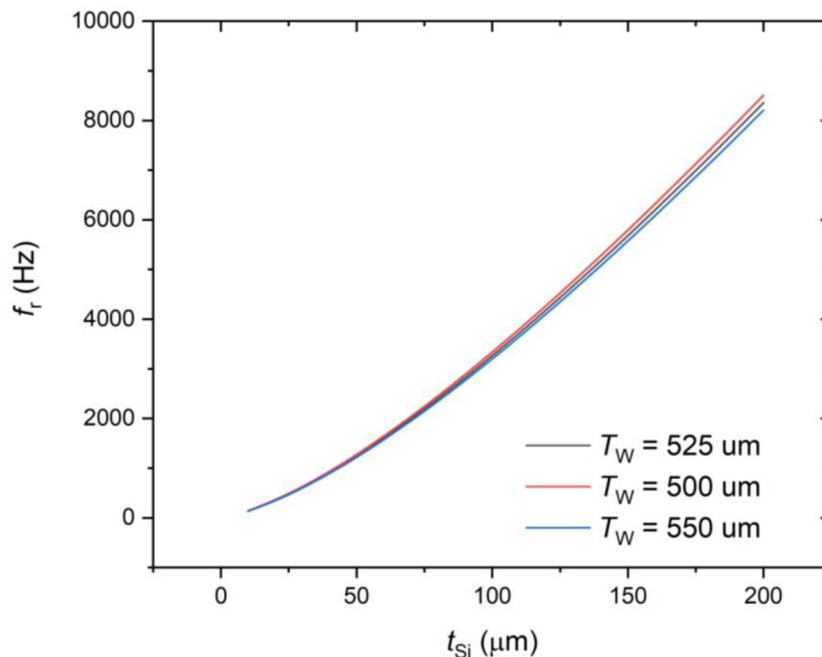
Výchozím modelem (Obr. 4.8) je PEH složený ze 4 materiálů (elementů):

- Strukturní Si (SOLID186)
- Spodní Ti vrstva sloužící jako růstová zárodečná vrstva pro růst AlN (SOLID186)
- Piezoelektrický materiál AlN (SOLID226)
- Horní Al elektroda (SOLID186)



Obr. 4.8: Parametrický 3D model PEH se znázorněním počátečních podmínek

Tento model je plně parametrizován, takže lze jednoduše měnit veškeré parametry a pozorovat, jak ovlivňují f_r . Jedním z nejdůležitějších parametrů určující výslednou f_r je tloušťka strukturního Si (mimo závaží). Na obr. 4.9 můžeme vidět lineární závislost f_r na různé tloušťce Si. Vzhledem k velké změně rezonanční frekvence na hmotnosti závaží v předchozích strukturách byly provedeny simulace s okrajovými parametry tloušťky používaných waferů (T_w). Tloušťka waferu včetně její odchylky $\pm 25 \mu\text{m}$ nemá výrazný vliv na posun f_r , což je způsobeno mnohem nižší hmotností Si než kovů.

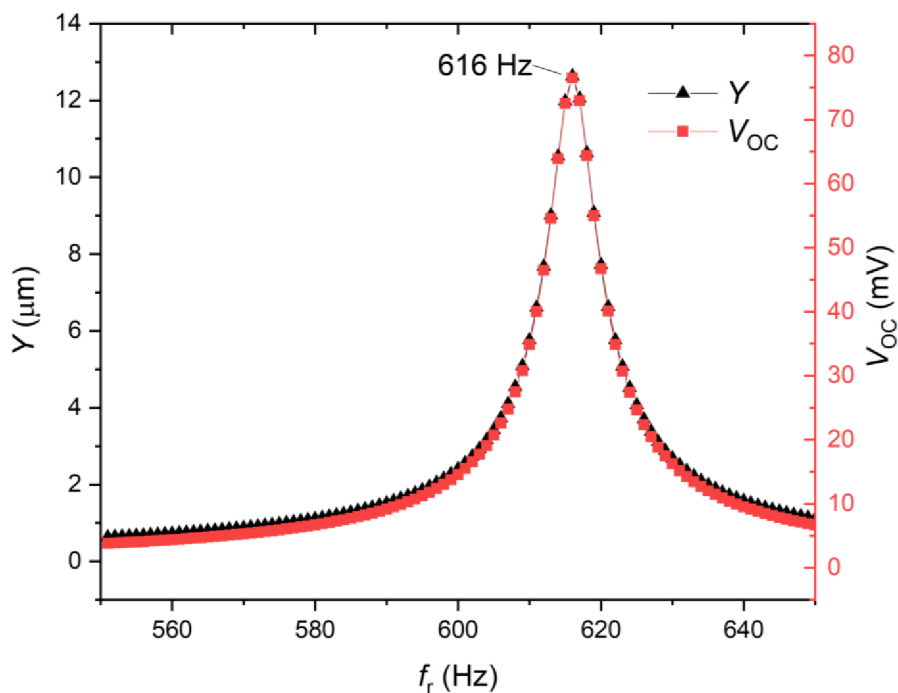


Obr. 4.9: Závislost f_r na tloušťce strukturního Si při různých tloušťkách waferu

Abychom dosáhli využitelných frekvencí popsaných na začátku kap. 4 - je nutné tloušťku omezit co nejvíce, přibližně na 10-30 μm . Neméně důležitým faktorem je celková velikost PEH. Velikost čipu nesmí přesáhnout $(6 \times 6) \text{ mm}^2$ aby bylo možné upevnit čip do pouzdra (popsáno v kap. 5). Tím se zredukovala velikost pro aktivní plochu na $(4,5 \times 4,5) \text{ mm}^2$. Nejdelší PEH byl tedy 4 mm. Maximální šířka byla zvolena na 2 mm. Závaží PEH má půdorys čtverce. Délka jedné strany čtverce vždy odpovídá šířce PEH.

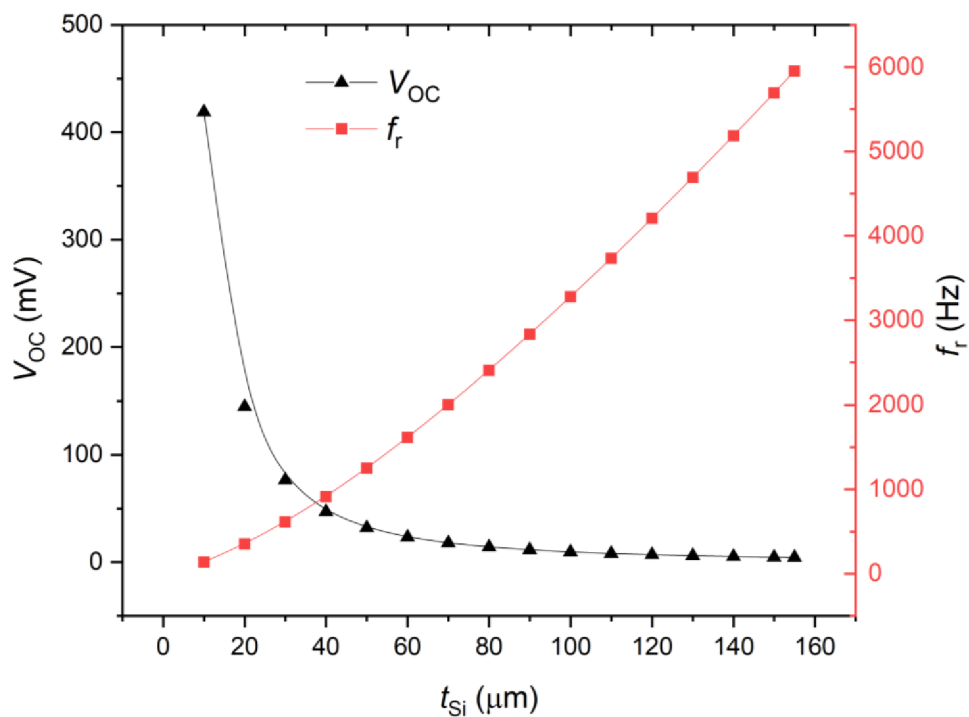
4.2.2 Harmonická analýza PEH s generací napětí

K vybuzení PEH bylo použito okrajové podmínky „Acceleration“ – zrychlení, které bylo aplikováno na uchycenou část PEH. Hodnota tohoto zrychlení byla nastavena na $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\approx 0.5 \text{ g}$), což odpovídá reálným hodnotám používaných při měření. Na obr. 4.10 jsou vyneseny závislosti generovaného napětí (V_{OC}) a maximální výchylky. Použitý 3D model je stejný jako v modální analýze při stejné tloušťce ($t_{Si} = 30 \mu\text{m}$). Jelikož velikost generovaného napětí je přímo úměrná maximální výchylce (maximálnímu natažení materiálu) mají tyto dvě křivky stejný průběh. Hodnota V_{OC} je při rozpojeném obvodu – k PEH není připojen zátěžový rezistor.



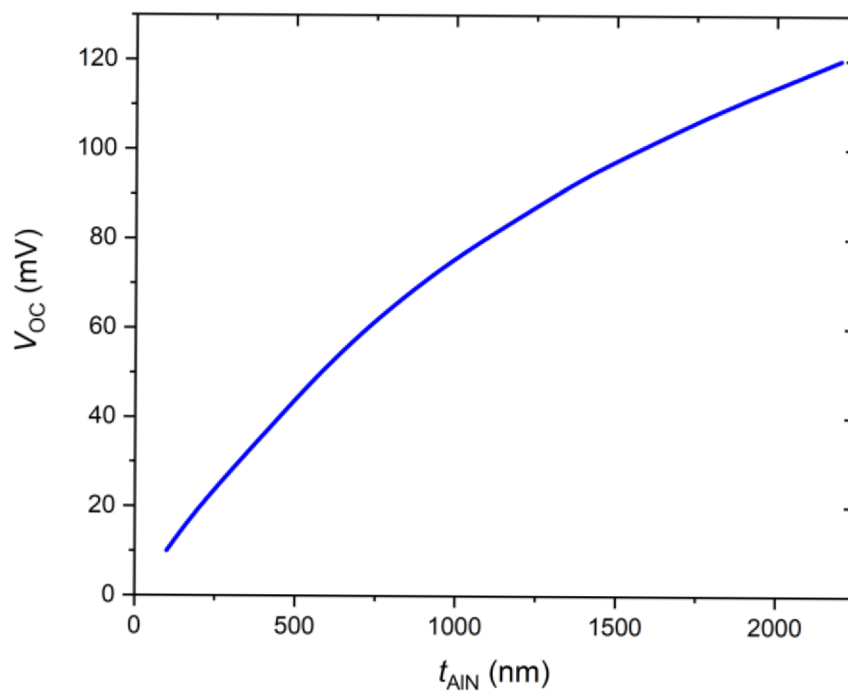
Obr. 4.10: Závislost Y a V_{OC} na frekvenci

Další analýzou byla velikost V_{OC} při různých tloušťkách Si. Na obr. 4.11 lze vypořadovat, že zatímco s klesající tloušťkou roste generované napětí, f_r lineárně klesá. To je způsobeno zvýšením výchylky PEH.



Obr. 4.11: Závislost V_{OC} na t_{Si} v porovnání s f_r při jednotlivých tloušťkách

Ke zjištění maximálního generovaného napětí byly dále provedeny simulace v závislosti tloušťky AlN a maximálního V_{OC} . Na obr. 4.12 vidíme, že s rostoucí hodnotou t_{AlN} se zvyšuje i hodnota V_{OC} . V první části křivky je tato změna téměř lineární, ale s přibývajícím tloušťkou se křivka postupně srovnává. Nebyl však nalezen saturační bod v rámci výrobitelných mezí, při kterém by přestalo V_{OC} narůstat.

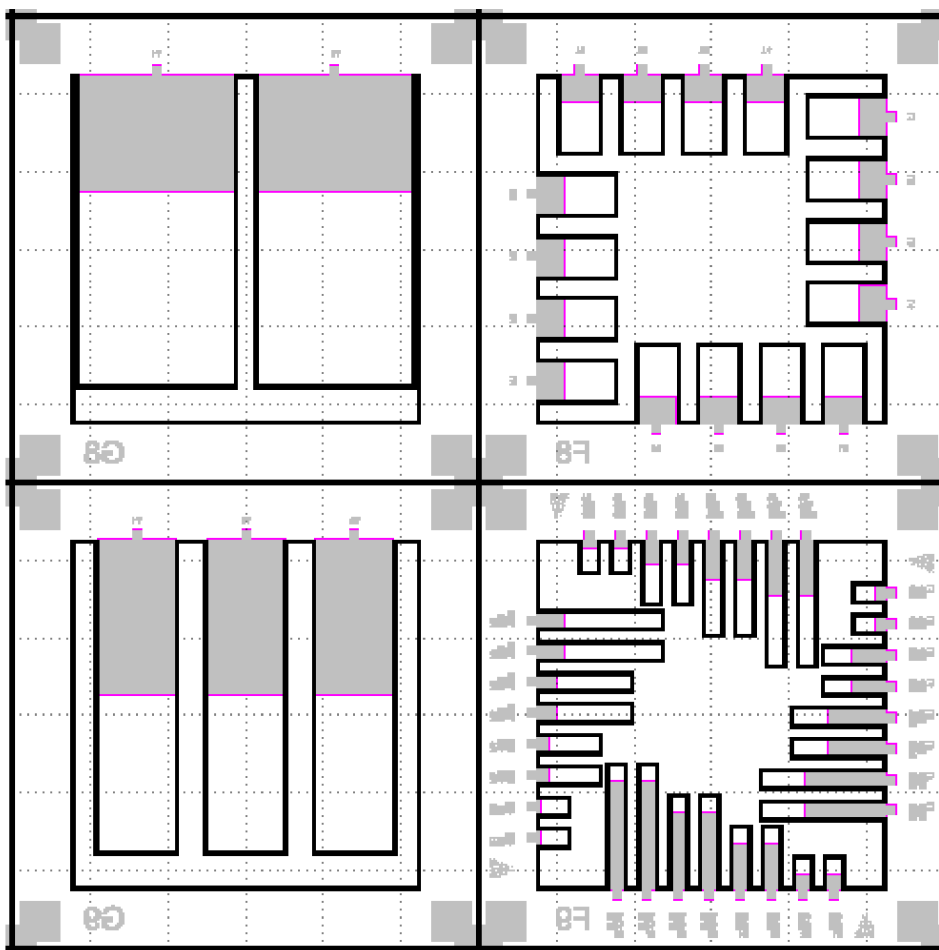


Obr. 4.12: Závislost V_{OC} na tloušťce AlN

5 VÝROBA PEH

Výrobní proces probíhal v čistých prostorech třídy 100 ve Středoevropském Technologickém Institutu (CEITEC). Tyto prostory zaručují velmi nízkou koncentraci prachových částic a nedochází tedy k nadměrnému znečišťování vyráběných struktur.

Před výrobou byl vytvořen návrh struktur ve skriptovacím programu CNSTNanoToolBox (V2018.11.1) a finální zobrazování a finální export „gds“ souborů v programu KLayout (v0.25.8). V designu se objevují 4 různé typy čipů PEH (Obr. 5.1)



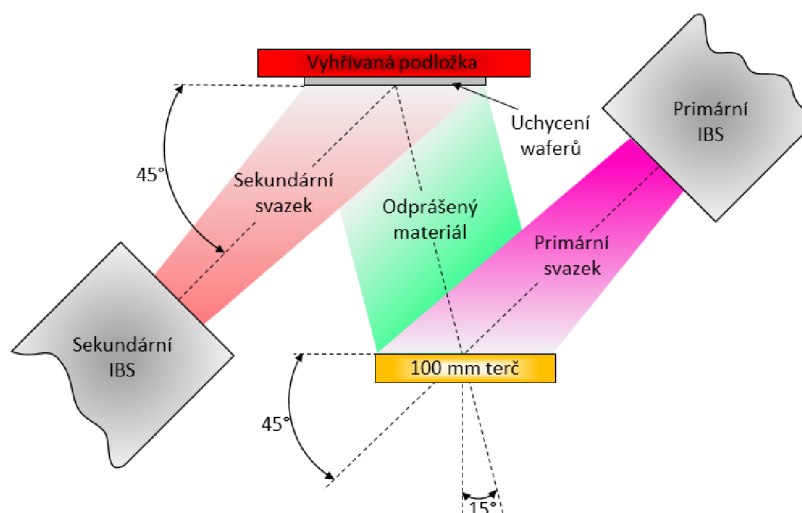
Obr. 5.1: Design čipů v programu KLayout – fialová barva znázorňuje první litografii, šedá druhou litografii a černá barva třetí litografii (čtvrtá litografie není pro přehlednost zobrazena)

Prvním typem čipu simulovaným v předchozí kap. Je čip se dvěma PEH o rozměrech $(4000 \times 2000) \mu\text{m}^2$ od tohoto čipu se očekává nejvyšší generační potenciál. K ověření dalších vlastností se vyroben další typ čipu, kde jsou umístěny tři PEH o velikostech rozměrech $(4000 \times 1000) \mu\text{m}^2$ ke zjištění reálného dopadu šířky PEH na velikost generovaného napětí. Dalším typem čipu jsou PEH o různých celkových délkách a různě dlouhých AlN vrstev. Tento čip cílí na využití různých vyšších frekvencí např. pro generaci energie do kochleárních implantátů. Posledním typem jsou struktury o velikosti $(1000 \times 500) \mu\text{m}^2$. Tyto struktury měly za úkol zjistit, jak ovlivní sériové, případně paralelní spojení čipů velikost generovaného napětí. Sériové zapojení by se zajistilo různým kontaktováním hotových struktur. Velikost čipů byla

zvolena na rozměry $(6 \times 6) \text{ mm}^2$, aby je po výrobě bylo možné jednoduše přilepit do bezvývodového pouzdra s 68 kontakty (leadless chip carrier – LCC68).

5.1 Depozice a vlastnosti AlN vrstvy

Depozice AlN probíhala pomocí Kaufmanova iontového zdroje (ion beam source – IBS). Jednalo se reaktivní iontové naprašování – do iontového zdroje je kromě Ar napouštěn také N_2 , který reaguje s odprašovaným Al a deponuje se na substrát jako AlN. Schematické znázornění aparatury je na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Schématické rozložení Kaufmanova IBS se sekundárním zdrojem

Byla testována krystalografická struktura AlN na různých podložních materiálech jako Si (100), Si (111), amorfni SiO_2 a Ti (100). Depoziční teplota byla rozmítaná v rozmezí $100\text{--}340 \text{ }^\circ\text{C}$. Nižší teploty nešlo dosáhnout, protože substrát je zahříván dopadem naprašovaného materiálu. K nalezení nejlepších parametrů byly rozmítány i proud iontového svazku (ion beam current – IBC) a jeho energie (ion beam energy – IBE). Z těchto parametrů byly poté určeny materiálové vlastnosti AlN pomocí rentgenovým difraktometrem (XRD) a elipsometrie.

5.1.1 Optimalizace depozičního procesu AlN

Depozice byla prováděna na nařezané waferové kousky Si o rozměrech $(20 \times 20) \text{ mm}^2$. Všechny vzorky byly před depozicí očištěny Ar iontovým svazkem ze sekundárního IBS. Parametry svazku byly následující: IBE – 30 eV , IBC – 15 mA , čas odprašování – 180 s .

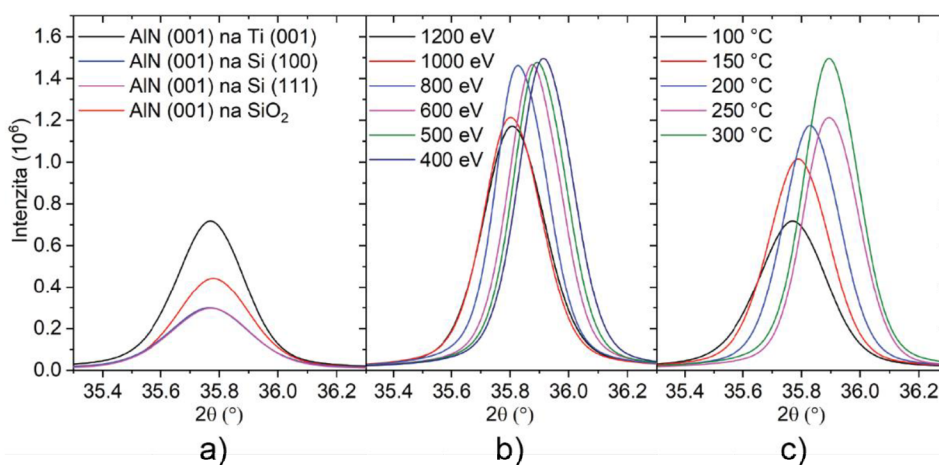
Výchozími materiály pro depozici AlN byly Al terč o čistotě $99,999\%$ a plyny Ar a N_2 o čistotě $99,99999\%$. V tab. 5.1 jsou uvedeny parametry depozice pro jednotlivé pokusy. Experiment č. 1 byl zaměřen na optimalizaci teploty a IBE bez vlivu sekundárního zdroje. Druhý experiment byl vyladění parametrů sekundárního zdroje, které částečně eliminovaly pnutí. Třetí experiment slouží k získání vrstvy bez pnutí. Tlak v komoře při depozici se pohyboval v rozmezí $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ až $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$. Depoziční rychlost byla monitorována pomocí QCM senzoru. Výsledná průměrná tloušťka byla určena pomocí elipsometrie na $(195,9 \pm 8,2)$

nm což je v mezi požadované tloušťky (200 nm).

Tab. 5.1: Depoziční parametry AlN pro optimalizaci procesu

exp.	primární IBS				sekundární IBS				T (°C)
	IBE (eV)	IBC (mA)	Ar (ml·min ⁻¹)	N ₂ (ml·min ⁻¹)	IBE (eV)	IBC (mA)	Ar (ml·min ⁻¹)	N ₂ (ml·min ⁻¹)	
č. 1	1200	65	0	8,0	IBS vypnut				100
	1000	50		6,5					150
	800	36		6,0					200
	600	23		5,5					250
	500	18		5,2					300
	400	13		5,0					
č. 2	400	13	0	5,0	20	6	10	0	330
							0	10	
					30	7	10	0	340
č. 3	400	13	0	5,0	20	6	0	10	330
			1,5	3,5					
			2,5	2,5					
			3,5	1,5					
			5,0	0					

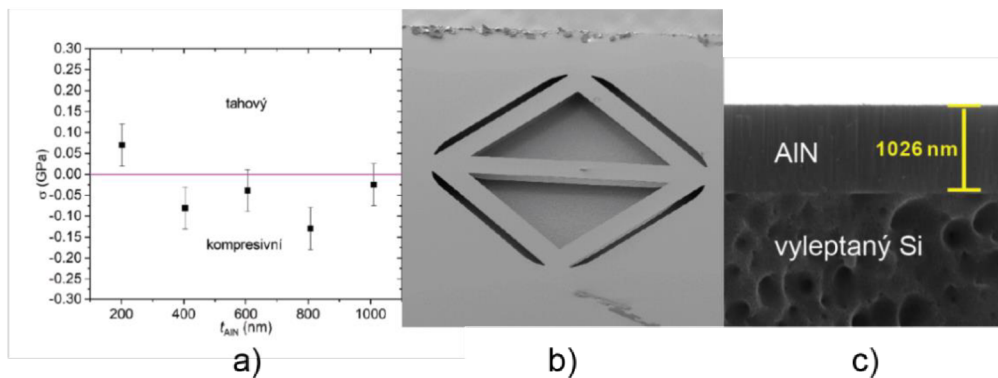
Z rentgenových difrakčních záznamů (Obr. 5.3) můžeme zjistit, jak jednotlivé parametry ovlivňují kvalitu výsledného maxima intenzity. Z obr. 5.3a vidíme, že nejvyšší intenzitu vykazuje AlN deponované na povrch Ti (001), což je způsobeno podobnou krystalovou strukturou Ti a AlN s velmi nízkým rozdílem mřížkových parametrů obou materiálů. Z obr. 5.3a,b lze pozorovat zvyšování difrakčních maxim při rostoucí teplotě a snižování IBE.



Obr. 5.3: Difrakční záznam provedených AlN experimentů

5.1.2 Minimalizace pnutí ve vrstvě

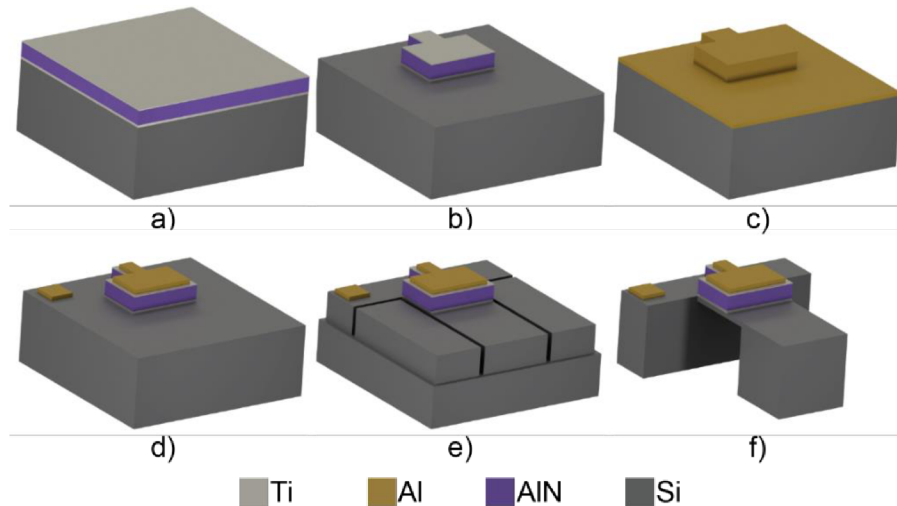
Kontrola pnutí ve vrstvě je velmi důležitým bodem jakékoliv depoziční technologie. Vzhledem k tomu, že příliš vysoké pnutí, ať už tahové nebo tlakové (kompresivní) dokáže způsobit samovolné praskání vrstev nebo ohýbání vyrobených MEMS struktur. Bylo zjištěno, že při nižších hodnotách IBE a vyšších teplotách dochází ke zlepšení parametrů AlN – snížení pnutí a zvýšení d_{33} . Další snížení kompresivního pnutí je možné docílit bombardováním substrátu sekundárním zdrojem s nízkým IBE. Různým poměrem Ar:N₂ bylo docíleno změny pnutí z kompresivního na tahové. Velikost pnutí je nezávislá na tloušťce deponovaného materiálu. Na obr. 5.4a je znázorněna závislost pnutí na tloušťce AlN v rozmezí 200-1000 nm. Pnutí materiálu se pohybovalo na velmi nízkých hodnotách v rozmezí od 0,05 GPa do – 0,15 GPa, což je v rámci chyby použité měřicí metody. Na obr. 5.4b je vyrobená struktura diamantového tvaru určená k charakterizaci pnutí ve vrstvě. Je vidět, že struktura není prohnutá, a tudíž je v ní téměř nulové pnutí. Na obr. 5.4c je řez deponované vrstvy na Si, kde můžeme pozorovat krystalovou orientaci AlN.



Obr. 5.4: a) závislost hodnoty pnutí na tloušťce AlN, b) diamantová struktura bez prohýbání, c) řez $\approx 1 \mu\text{m}$ AlN vrstvou

5.2 Výrobní proces

Vlastní výroba se skládá ze čtyř litografických kroků, což je v porovnání s literaturou o 2-4 kroky méně. Výrobní proces je tím pádem snadnější a rychlejší. Postup výroby čipů je znázorněn na 3D modelu (Obr. 5.5). Jednotlivé výrobní kroky jsou více rozepsány v následujících kapitolách.



Obr. 5.5: a) výchozí sendvičová struktura Si/Ti/AlN/Ti, b) 1. litografie – vytvarování PEH, c) depozice 500 nm Al, d) 2. litografie – tvarování vrchní a spodní elektrody, e) 3. litografie – vyleptání prohlubní z vrchní strany, f) 4. litografie – vyleptání prohlubní ze spodní strany a ztenčení struktury PEH

5.2.1 Příprava

Před výrobou bylo nutné nejprve vytvořit čtyři masky, které sloužily k následnému osvětlení Si waferů. Byly použity masky fy ROSE Fotomasken. Na maskách je již předem nanášena vrstva Cr a pozitivní fotorezist (FR) AZ1518 o tloušťce 500 nm. Expozice masek probíhala na přístroji UV Direct Write Laser system (DWL) 66-fs (Heilderberg instruments). Čas expozice jedné masky byl závislý na motivu a pohyboval se v rozmezí 12-14 h. Naexponované masky byly poté vyvolány ve vývojce AZ726 - MIF po dobu 20 s. Pro zajištění přenosu motivu na substrát musí být dále vyleptána vrstva Cr. Toho bylo docíleno mokrou cestou v leptadle TechniEtch Cr01 (Chrome Etch n°1) po dobu 50 s.

Před nanášením FR bylo třeba použít adhezni promotor hexametyldisilazan (HMDS), který zlepšuje smáčivost povrchu a tím adhezi FR. HMDS byl nanášen v komoře VP8 na přístroji SÜSS Wetbench. Proces nanášení probíhal ve fázích při 135 °C:

- Vyčerpání vzduchu a proplach N₂
- 15 s napouštění HMDS
- 45 s reakce
- 3× opakování

Pro litografické procesy bylo použito dvou typů FR. Prvním FR je AZ 5214 E. Jedná se standardní pozitivní fotorezist s možností převrácení motivu tzv. „image reversal“. Druhým použitým FR byl AZ 9260, který umožňuje nanášení v tlustších vrstvách, což je žádoucí u

dlouhých leptacích procesů. Tento FR je možné nanášet ve dvou tloušťkách $\approx 10 \mu\text{m}$ a $\approx 24 \mu\text{m}$. Během výroby bylo zjištěno, že pro zvolený technologický postup dostačuje tloušťka $\approx 10 \mu\text{m}$. Při použití tlustší vrstvy FR však docházelo ke zhoršení litografického rozlišení, z tohoto důvodu byly všechny sesazovací značky vytvořeny ve druhé kovové vrstvě, která tak zaručuje nejvyšší přesnost sesazení. K nanesení obou typů FR byl použit poloautomatický přístroj RCD8 (SÜSS MicroTec). Parametry použité pro nanesení, zapečení (soft-bake) a expozici FR jsou shrnuty v tab. 5.2.

Tab. 5.2: Parametry nanesení, zapečení a expozice PR AZ 5214 E a AZ 9260

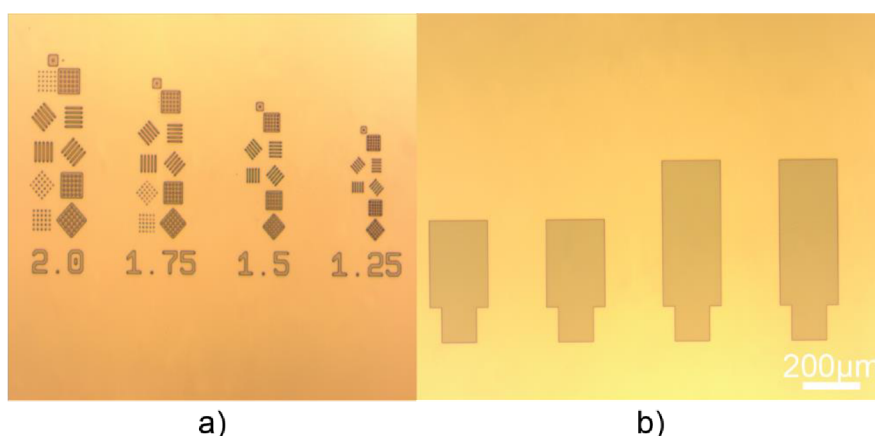
PR	nanesení		soft-bake		expozice		
	otáčky (rpm)	čas (s)	T (°C)	čas (s)	dávka (mJ/cm ²)	vývojka	čas (s)
AZ 5214 E	4000	60	110	50	85	AZ EBR	60
AZ 9260	2400	60	110	175	1500	AZ400K	240

5.2.2 Realizace výrobního procesu

Výchozím materiálem pro výrobu byly oboustranně leštěné $\varnothing 100 \text{ mm}$ (100) Si waferly dopované N/As s rezistivitou $< 0,005 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$. Tloušťka waferů je $(525 \pm 25) \mu\text{m}$. Na tyto waferly byly v prvním kroku provedeny následující depozice pomocí Kaufmanova IBS:

- 80 nm Ti sloužící jako růstová vrstva pro následnou depozici AlN
- AlN (200 nm - 1000 nm)
- 15 nm Ti sloužící jako ochranná vrstva pro případ, že by bylo nutné AlN leptat mokrou cestou.

Pro první litografický krok byl použit FR AZ 5214 E. Expozice probíhala na přístroji MA8 fy SÜSS MicroTec. K osvitu byla použita dávka 85 mJ/cm^2 . Jelikož se jednalo o první expozici, nebylo zde nutné sesazování. Vyvolání motivu probíhalo v kádince s vývojkou AZ EBR (PGMEA) po dobu 60 s. Rozlišitelný detail byl $1,25 \mu\text{m}$ (obr. 5.6a). Na obr. 5.6b je zobrazen detail vyvolaného motivu – budoucích AlN struktur.



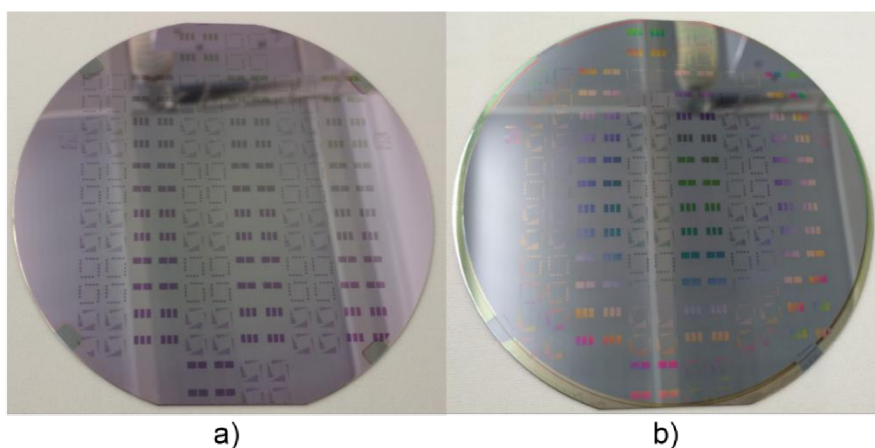
Obr. 5.6: a) Dosažené rozlišení motivu při první litografii s použitím FR AZ 5214 E, b) detail struktur

Následujícím krokem bylo vyleptání všech deponovaných vrstev. Leptání probíhalo suchou cestou pomocí chlorového procesu v přístroji PlasmaPro 100 (Oxford Instruments). Experimentálně byla ověřena rychlost leptání AlN, která při použití standardního procesu činí ≈ 130 nm/min. Parametry procesu leptání jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tab. 5.3: Parametry leptání Ti, AlN a Al v přístroji PlasmaPro 100

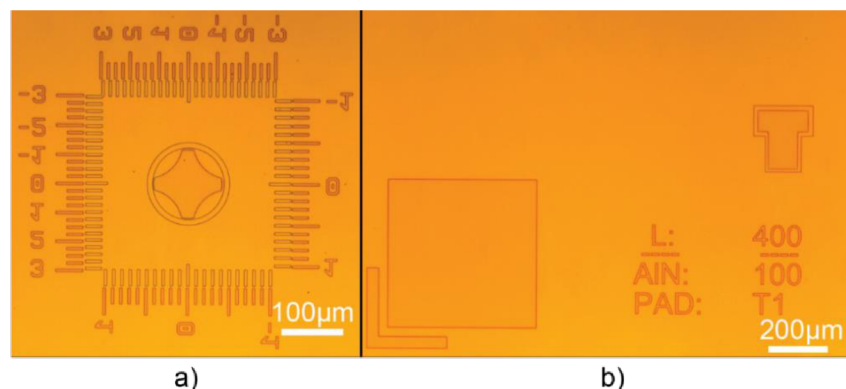
mat.	P (mTorr)	ICP (W)	HF (W)	DC Bias (V)	BCl ₃ (ml·min ⁻¹)	Cl ₂ (ml·min ⁻¹)
AlN+Ti	10	1000	300	570	25	10
Al	4	300	70	240	10	30

Po dokončení procesu následovalo odstranění FR v rozpouštědle 1-Methylpyrrolidin-2-on (NMP) a následné dočištění desek pomocí O₂ plasmy v mikrovlnném generátoru Diener NANO Plasma Stripper. Na obr. 5.7 je zobrazen wafer před a po leptání.



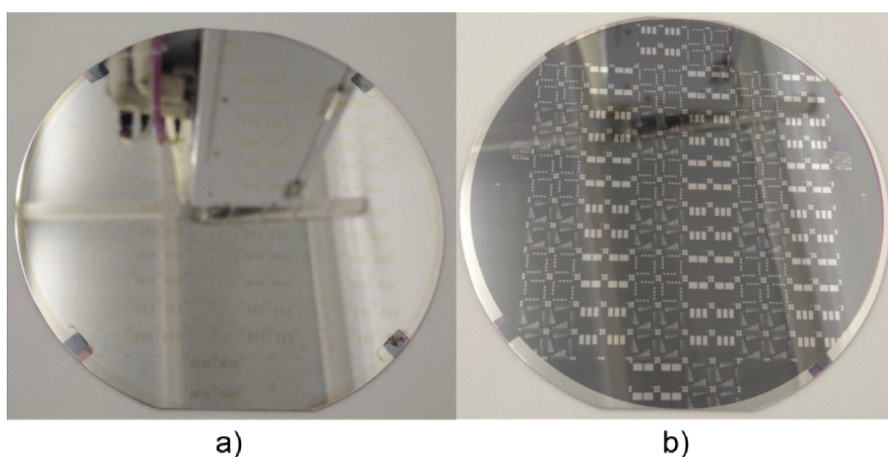
Obr. 5.7: a) Wafer před leptáním vrchní Al vrstvy a AlN, b) wafer po leptacím procesu

Dalším bodem výroby bylo naprášení 500 nm Al na vyleptané desky. K naprášení byl použit Kaufmanův IBS. Tento Al slouží jako vrchní elektroda, spolu s 15 nm Ti na vyleptaných AlN strukturách. Zároveň tento Al slouží i jako kontakt spodní elektrody v místech dotyku s Si. Na deponované desky byl nanesen stejný FR jako v případě předchozí litografie. Jediný rozdíl spočíval v sesazení současného motivu na předchozí (Obr. 5.8a ukazuje sesazený motiv na Al a používané sesazovací značky). K tomu byl použit asistovaný mód MA8, který umožňuje docílit velmi přesného sesazení v řádu stovek nm. Z Vernierových posuvníků můžeme určit k jak velkému posunutí při litografii došlo – v tomto případě je posun o +400 nm v ose x a +300 nm v ose y. Na obr. 5.9b je detail litografie, kde je vidět spodní rohová elektroda, označení čísem a označení struktur na čipu, jejich celková délka a délka AlN.



Obr. 5.8: a) Detail sesazovacích značek (diamant v kruhu), b) spodní čtvercová elektroda, označení struktur a vrchní elektroda

Po litografii došlo opět k vyleptání nyní deponovaného Al. Tab. 5.3 uvádí přehled parametrů leptání. Leptací rychlost procesu byla ≈ 250 nm/min. Vyleptané desky byly následně očištěny a připraveny na další krok.

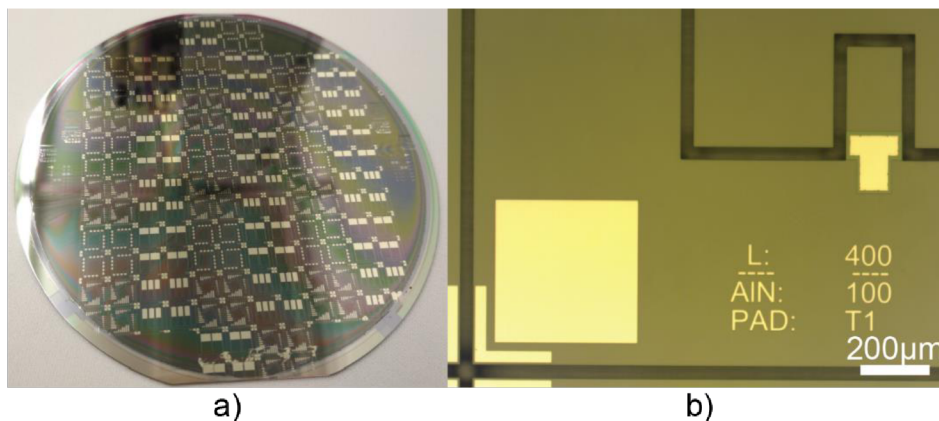


Obr. 5.9: a) Wafer s 500 nm Al s litografií připravený k leptání, b) wafer po leptání Al v RIE

Třetím litografickým krokem je vytvoření prohlubní v Si z vrchní strany desky. Vzhledem k tomu, že se jedná o dlouhý proces, bylo nutné zvolit FR AZ 9260, aby nedošlo k jeho odleptání během probíhajícího procesu a tím i zničení již vytvořených struktur. Dle tab. 5.2 byl na substrát nanesen FR. Následovalo hloubkové reaktivní leptání (DRIE) Si. Z testovacích waferů byla určena rychlost leptání procesu na $\approx 1 \mu\text{m}\cdot\text{cyklus}^{-1}$, tato rychlost se však snižuje s rostoucí hloubkou. Jelikož při tomto procesu vzniká velké množství tepla, je nutné wafery v přístroji chladit. K tomu se používá tekutý dusík, který je automaticky ventilem dávkován na udržení zadané teploty. PlasmaPro Cobra umožňuje nastavení teploty -180 °C až $+80$ °C. Při teplotách nižších než 0 °C však docházelo k popraskání PR, pravděpodobně z důvodu zachycené vlhkosti ve FR, a tudíž i k poškození motivu. Procesní teplota byla nastavena na 5 °C s tlakem chladicího He (P_{He}) ≈ 10 Torr. Do procesu však musely být vloženy 120 s dlouhé pauzy po každých 50 cyklech, jinak docházelo ke spálení povrchu FR. Hloubka leptání z vrchní strany byla zvolena na $\approx 300 \mu\text{m}$ (Na obr. 5.10b je detail na vyleptanou prohlubeň). Parametry DRIE procesu jsou uvedeny v tab. 5.4. Po tomto procesu byl zbylý PR odstraněn a nahrazen novým AZ 5214 E sloužícím jako ochranná vrstva již vytvořených struktur.

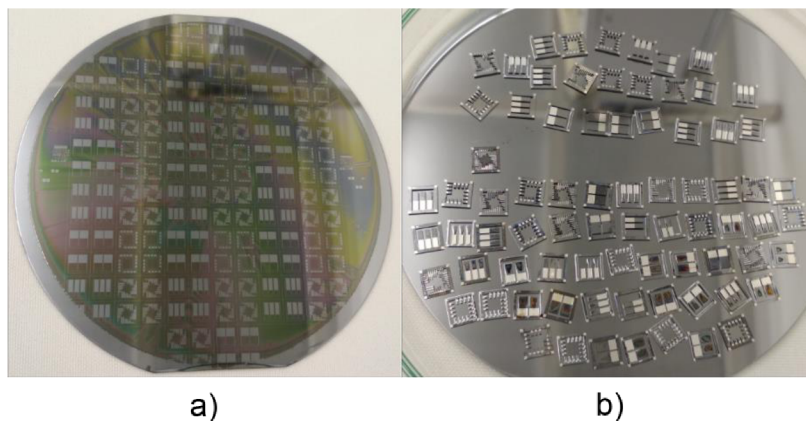
Tab. 5.4: Parametry jednoho cyklu DRIE procesu při konstantních parametrech: $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{He}} = 10\text{ Torr}$

Krok	Tlak (mTorr)	ICP (W)	HF (W)	DC Bias (V)	SF ₆ (ml·min ⁻¹)	C ₄ F ₈ (ml·min ⁻¹)	Čas (s)
Dep	40	2500	0	0	5	200	1,750
Breakthrough	25	2500	40	121	160	5	1,950
Etch	70	2500	0	0	400	5	3,250



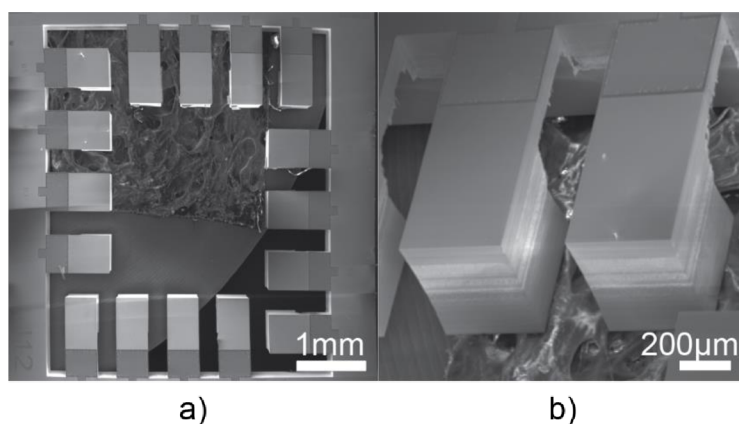
Obr. 5.10: a) Wafer před DRIE z vrchní strany s vyvolaným motivem, b) detail vyleptaného a očištěného čipu

Posledním litografickým krokem bylo nanesení FR AZ 9260 a expozice na zadní straně waferu. Expozice byla provedena opět na MA8, protože je tento litograf vybaven objektivy i ze spodní strany. Proces sesazení funguje tak, že se pomocí zadních objektivů vytvoří obraz sesazovaných značek a uloží se jejich pozice. Poté lze již podle asistovaného sesazení zaměřit původní značky (vytvořené v druhém kroku) a docílit tak přesného sesazení, což je v tomto kroku obzvláště kritické. Spodní litografie tak navazuje na tu vrchní a po dokončení procesu došlo k rozdělení celého waferu na jednotlivé čipy (Obr. 5.11b).



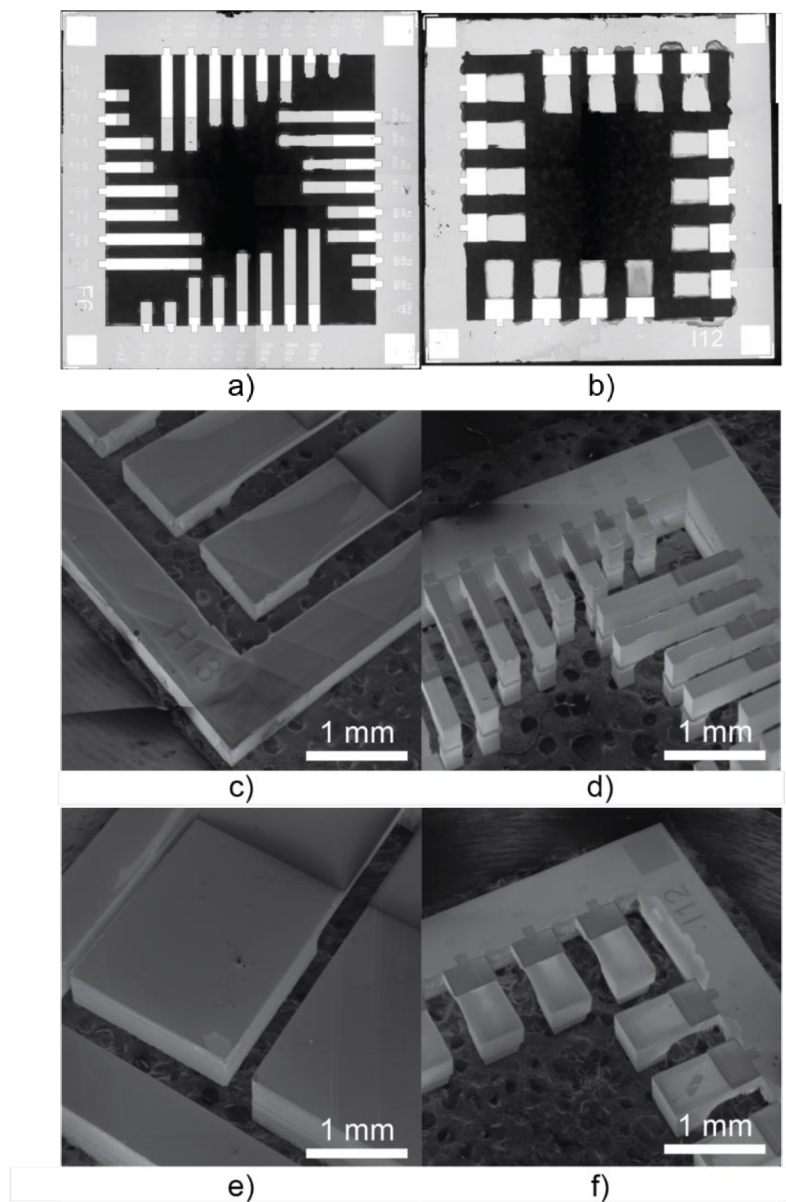
Obr. 5.11: a) sesazená čtvrtá litografie ze zadní strany, b) jednotlivé čipy po leptání

Problémem této litografie byl ne zcela správný návrh masky. Efekt nazývaný jako „Aspect Ratio Dependent Etching – ARDE“ se projevuje rychlejším leptáním větších ploch než úzkých čar. Aby se zabránilo proleptání plochy pod strukturou, bylo předchozí leptání provedeno do větší hloubky, čímž se tento efekt kompenzuje. K rozdělení waferu došlo po ≈ 400 cyklech v DRIE. V polovině procesu byl leptaný wafer vytáhnout a připevněn na podložní wafer. K připevnění a zajištění dostatečného tepelného kontaktu byl použit Fomblin®. Jinak by nebylo možné vyleptané struktury vytáhnout bez zavzdušnění celé aparatury a hrozilo by poleptání podložního stolku. Tloušťka strukturního Si při rozpadání waferu činila $\approx 185 \mu\text{m}$, z tohoto důvodu probíhalo leptání déle až do požadované tloušťky. Jednotlivé čipy pak byly důkladně očištěny v NMP a O_2 plazmě a poté upevněny do pouzdra. Po DRIE byl vnitřek čipu přilepen FR naneseným z vrchní strany, proto k vypadnutí vnitřní části došlo až při čištění. Očištěné čipy zobrazuje fotografie z rastrovacího elektronového mikroskopu MIRA2 (Tescan) (Skenovací elektronový mikroskop – SEM) na obr. 5.12.



Obr. 5.12: a) Rozložení celého čipu, b) detail na PEH – tloušťka závaží je stejná jako tloušťka čipu

Fotografie ostatních vyrobených struktur z optického mikroskopu jsou na (Obr. 5.13a, b) a detail na struktury jsou ze SEM (Obr. 5.13c-f).



Obr. 5.13: a,b) fotografie vyrobených čipů z optického mikroskopu, c-f) detaily struktur čipů

Jelikož je tloušťka závaží na PEH stejná jako tloušťka waferu (525 μm), bylo nutné do pouzdra LCC68 vyříznout čtvercovou díru o rozměrech (4,5 \times 4,5) mm^2 pomocí Laser dicer Oxford Lasers A-Series. Tím byla zajištěna dostatečná volnost pohybu PEH. Čipy byly připevněny do pouzdra pomocí roztaveného vosku. PEH byly následně nakontaktovány k pouzdru pomocí termosonického wire-bondingu (45 $^\circ\text{C}$). Parametry jednotlivých bondů jsou uvedeny v tab. 5.5.

Tab. 5.5: Parametry kontaktování

Kontakt číslo	Výkon ultrazvuku (mW)	Čas ultrazvuku (mS)	Síla (mN)
1 (pouzdro)	350	250	300
2 (čip)	300	300	200

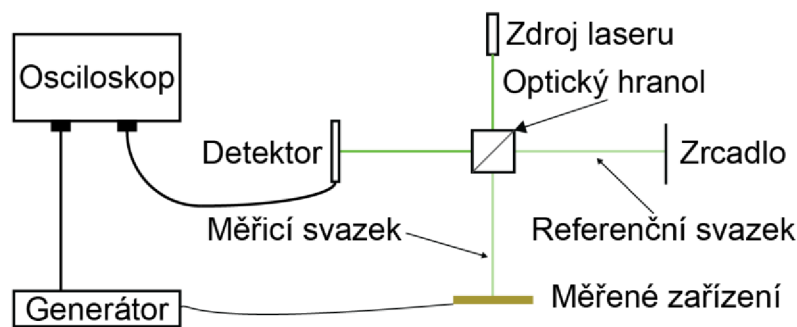
Tlak druhého bondu na čipu musel být snížen na co nejnižší hodnotu, aby nedošlo k mechanickému proražení piezoelektrické vrstvy a následnému zkratu mezi vrchní a spodní elektrodou. Použitá síla 200 mN však stále zaručovala jistotu spojení bondu s čipem. Při nižších hodnotách docházelo k odtrhávání bondů při zvednutí hrotu. Ke spolehlivému uchycení prvního bondu byla potřeba mnohem větší síla a z toho důvodu je první bond prováděn na pouzdře. Pro kontakty bylo použito wedge-bondingu pomocí 26 μm tlustého Au drátku na přístroji TPT HB 16.

6 CHARAKTERIZACE

Následující kapitola se věnuje měření vyrobených struktur. Z důvodu problémů při výrobě, které byly způsobeny poruchami aparatury pro DRIE, zbyl čas pouze na charakterizaci jednoho typu vyrobených struktur. Jedná se největší strukturu s rozměry $(4000 \times 2000) \mu\text{m}^2$ a závažím o tloušťce $525 \mu\text{m}$. Síla strukturního Si činila $\approx 130 \mu\text{m}$, což posunulo f_r na výrazně vyšší hodnoty. Vzhledem k tomu, že strukturní vrstva o tloušťce $10\text{-}30 \mu\text{m}$ je velmi náchylná na mechanické poškození, byla zvolena tato tloušťka t_{Si} , která zaručila bezproblémovou manipulaci a ověření funkčnosti.

6.1 Interferometrické měření

K rychlému zjištění rezonančních frekvencí a velikosti výchylky PEH bylo použito laserového interferometru. Jedná se o základní uskupení Michelsonova interferometru, při kterém je využíváno zeleného laseru o vlnové délce $\lambda = 532 \text{ nm}$. Schématické znázornění uspořádání experimentu je na obr. 6.1.

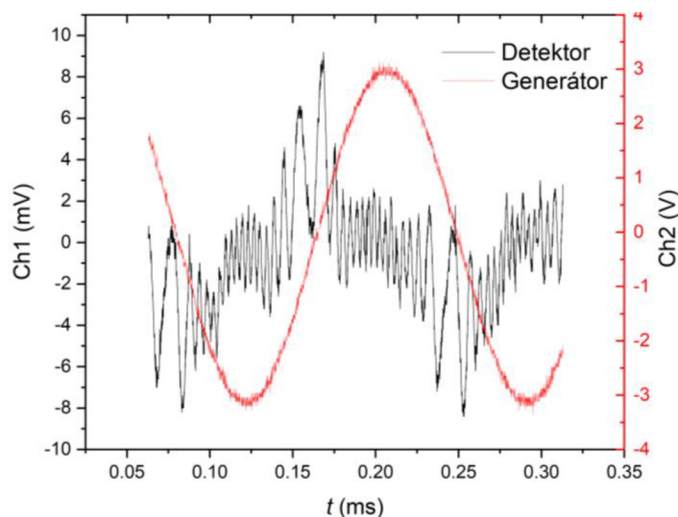


Obr. 6.1: Blokové schéma Michelsonova interferometru

Zdroj laseru prochází skrze optický polopropustný optický hranol, kde se štěpí na dva svazky – referenční a měřicí. Referenční svazek je odražen od zrcadla přímo na detektor. Měřicí svazek dopadá přes fokusační čočku na strukturu, kde se odráží zpět do hranolu a pod úhlem 90° se lomí do směru referenčního svazku. Na detektoru se pak složením těchto dvou svazků vytvoří interferenční obrazce, které jsou následně převedeny na elektrický signál a zobrazeny na osciloskopu Tektronix TDS 2022C (Obr. 6.2).

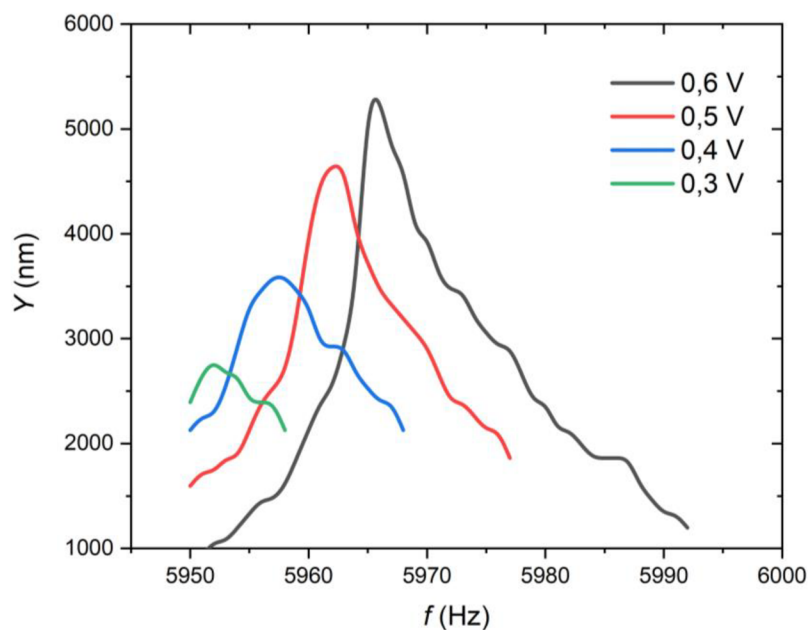
Výhodou tohoto měření je velmi rychlé určení rezonančních frekvencí a velikosti výchylky struktury s přesností limitovanou vlnovou délkou použitého laseru. Podle počtu interferenčních proužků (N) pak lze zpětně dopočítat velikost výchylky (Y) dle vztahu:

$$Y = \frac{\lambda}{2} \cdot N \quad (6.1)$$



Obr. 6.2: Záznam interferenčních proužků na osciloskopu při rezonanci

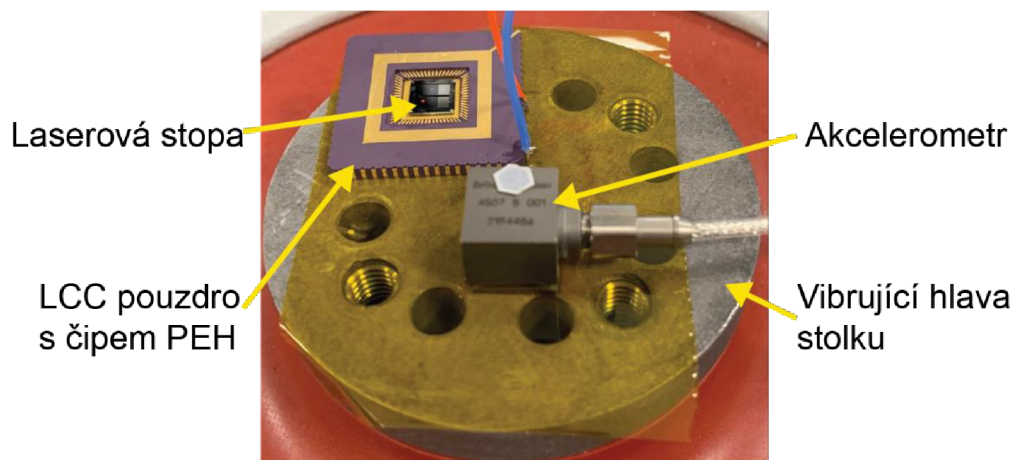
Pro ověření simulací a velikosti výchylky byly použity největší struktury z návrhu. Největší plocha umožňuje snadné zaměření a fokusaci svazku. Svazek byl fokusován na volný konec PEH do prostřední části struktury, čímž bylo zajištěno měření maximální výchylky. K buzení struktury byl použit funkční generátor. Po sladění měřicí struktury byla provedena frekvenční analýza od 1 Hz do 10000 Hz s krokem 1 Hz. V tomto rozsahu se objevila pouze jedna rezonance na hodnotě 5962 Hz. Po nalezení rezonance byl zkoumán vliv velikosti budicího napětí na polohu rezonance a velikost výchylky. Na obr. 6.3 je zobrazena závislost frekvence na Y pro různé hodnoty budicího napětí. Nepřesnosti v grafu jsou způsobeny manuálním odečítáním interferenčních proužků na obrazovce osciloskopu. S rostoucím budícím napětím dochází ke zvyšování výchylky struktury ale i k posunu f_r směrem k nižším frekvencím o ≈ 10 Hz/100 mV.



Obr. 6.3: Závislost polohy a velikosti rezonanční špičky na velikosti budicího napětí

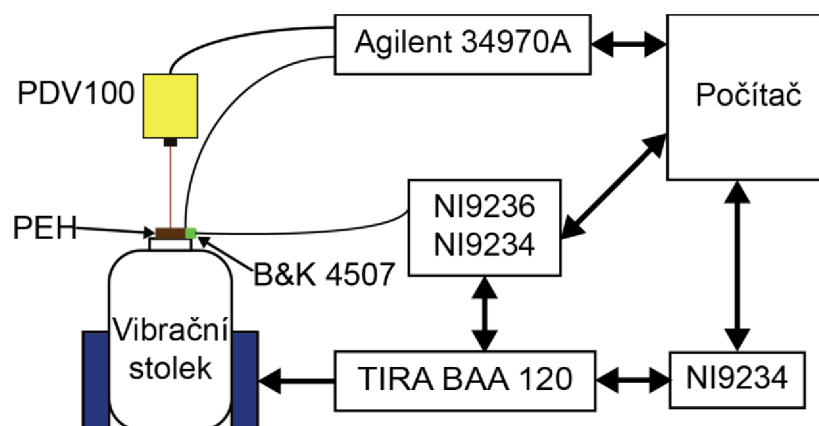
6.2 Měření na vibračním stolku

Po zjištění f_r pomocí interferometru byl proměřena frekvenční charakteristika na vibračním stolku. Blokové schéma automatického měřicího stanoviště je na obr. 6.5 [31]. Ke kontrole celého měřicího uspořádání bylo použito programu v LabView. Vibrační stůl je buzen a regulován přes zesilovač TIRA Power Amplifier BAA 120. K měření rychlosti pohybu struktury byl použit vibrometr Polytec PDV 100, který byl zaměřen na volný konec struktury. Vibrometr snímá rychlost pohybu a lze z něj určit, jestli se struktura hýbe při mechanickém buzení. K měření amplitudy vibrací byl použit akcelerometr B&K 4507. Ke zjištění velikosti generovaného napětí jsou na vývody pouzdra osazeného měřeným pouzdem připájeny drátky. Celé pouzdro je pak přes kaptonovou pásku přilepeno na hlavu vibračního válce (Obr. 6.4).



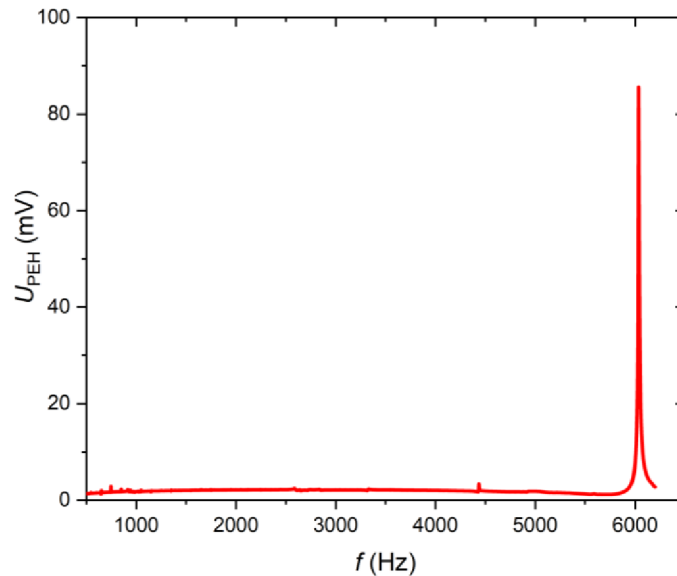
Obr. 6.4: Uchycení pouzdra a akcelerometru na vibračním stolku, na čipu můžeme pozorovat zaměřený laserový svazek z PDV 100 na konec PEH

Měřená hodnota je přivedena do datalogeru Agilent 34970A, kde je spolu s daty z PDV 100 měřena a posílána přes GPIB sběrnici do PC. Všechny tyto parametry jsou pak graficky zobrazeny v uživatelském programu. Ke zjištění maximálního generovaného výkonu jsou použity dvě karty NI9234 v Agilent 34970A s celkovým rozsahem odporů $100 \Omega - 2 \text{ M}\Omega$.



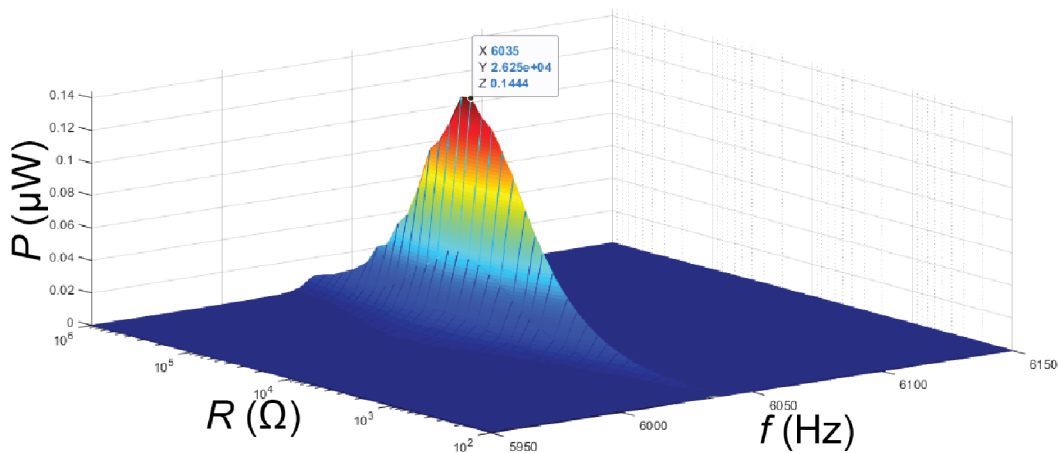
Obr. 6.5: Blokové schéma měřicí stanice

První analýzou bylo frekvenční rozmitání celého rozsahu vibračního válce (1 Hz až 6500 Hz). Touto analýzou bylo zjištěno, že při mechanickém buzení struktur nedochází ke vzniku dalších rezonančních frekvencí než při buzení elektrickém. Na obr. 6.6 je závislost napětí na rozpojeném obvodu (V_{OC}). K tomu byl použit největší dostupný odpor o velikosti 2 M Ω . Menší zákmity lze pozorovat i na nižších frekvencích (<1000 Hz), kde se pravděpodobně jedná o rezonance celého měřicího systému.



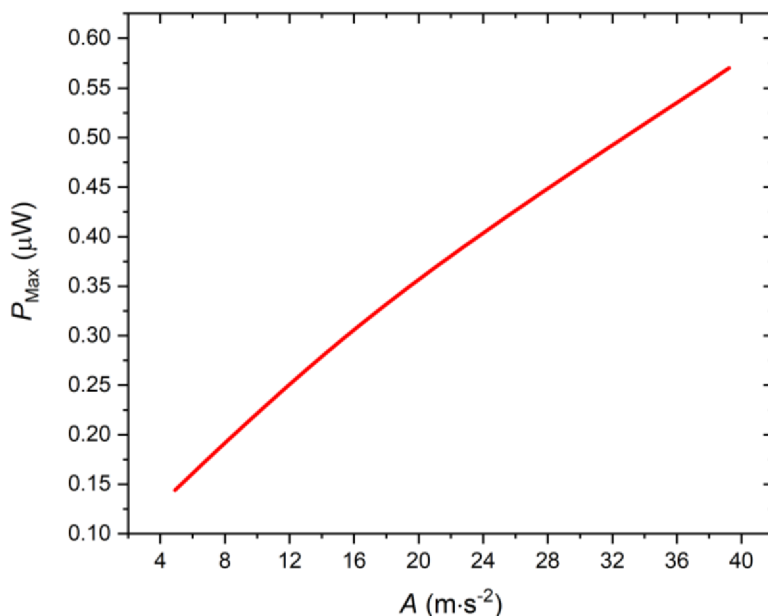
Obr. 6.6: Frekvenční charakteristika PEH při buzení $4,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Po ověření f_r bylo prováděno měření výkonových charakteristik. Na 3D grafu (Obr. 6.7) vidíme závislost maximálního generovaného výkonu (osa Z), na frekvenci (osa X) a velikosti zatěžovacího odporu (osa Y). Toto měření probíhalo se zrychlením $4,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Můžeme pozorovat, že $P_{\text{Max}} = 0,144 \text{ }\mu\text{W}$ bylo dosaženo při 6035 Hz se zatěžovacím odporem 26,3 k Ω .



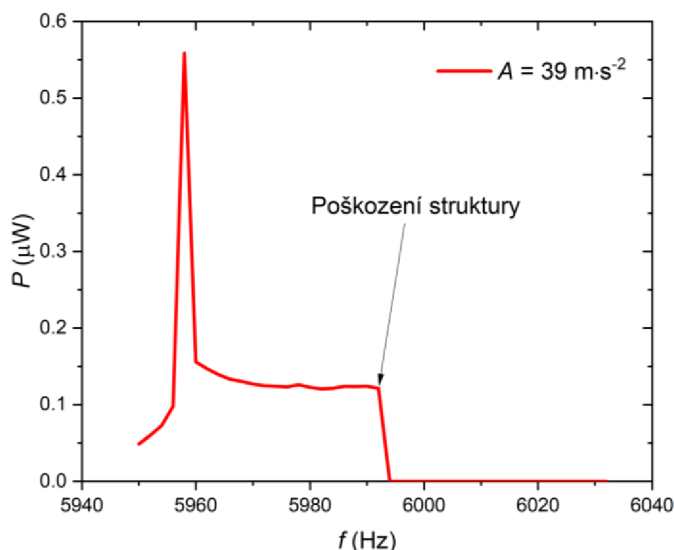
Obr. 6.7: Výkonová charakteristika PEH při buzení hodnotou $4,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. $P_{\text{max}} = 0,144 \text{ }\mu\text{W}$

Dalším měřením byla zjištěna závislost P_{Max} na amplitudě buzení. Na obr. 6.8 je závislost P_{Max} na zrychlení A . Můžeme pozorovat, že s rostoucí velikostí buzení roste i P_{Max} téměř linárně.



Obr. 6.8: Závislost P_{Max} na zrychlení A

Maximální hodnota buzení struktury byla $39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (4 g), kdy po projetí rezonanční frekvence došlo k rapidnímu poklesu generovaného výkonu (Obr. 6.9) a pravděpodobně k mechanickému poškození struktury. P_{Max} při tomto stupni buzení dosáhl hodnoty $0,56 \mu\text{W}$. Po poškození klesl P na nulovou hodnotu.



Obr. 6.9: Průběh výkonu při poškození struktury

Na předchozích obrázcích je vidět velká strmost maximálního vrcholku. Šířka tohoto vrcholu je $<2 \text{ Hz}$ což vypovídá o vysokém $Q \approx 800$ celého PEH.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámení se s problematikou sběru energie a její přeměnou na energii elektrickou se zaměřením na MEMS zařízení a jejich simulace, návrh a výrobu. Tato práce úspěšně popisuje všechny tyto části. V první části byly prostudovány základní principy přeměny energie. Nejvyšších zisků ze všech popsaných principů dosahovala energie sluneční. To ale pouze v případě ideálních podmínek, které pracují pouze omezenou část života těchto zařízení. Každá z popisovaných metod má své výhody a nevýhody. Záleží, pro jakou aplikaci by bylo dané zařízení využitelné. Pro tuto práci byl zvolen piezoelektrický jev a sběr energie z vibrací.

Byl popsán základní princip piezoelektrického jevu a prozkoumány používané piezoelektrické materiály. Tyto materiály byly mezi sebou porovnány. Zvoleným piezoelektrickým materiálem je AlN z několika důvodů: výborné piezoelektrické vlastnosti, neomezené T_c . FoM je srovnatelný, případně vyšší jak v porovnání s PZT, díky velmi nízké permitivitě AlN. AlN je také CMOS a biokompatibilní materiál. Nehrozí tedy žádné kontaminace přístrojů a depozice je relativně jednoduchá v porovnání s PZT. V další podkapitole jsou popsány základní principy, dle kterých PEH pracují. Principy jsou vysvětleny na mechanickém náhradním modelu PEH. Je zde popsáno několik důležitých rovnic, které popisují základní vlastnosti PEH.

Provedené simulace sloužily k ověření přesnosti modelu PEH. Jak bylo vidět ze simulovaných a měřených hodnot, lze tento model považovat za přesný. Vzhledem k tomu, že až na jednu výjimku – 3. $f_r = 12900$ Hz – všechny hodnoty odpovídaly naměřeným. To může být způsobeno například pozůstatky nečistot při přípravě vzorků nebo neideální geometrií simulované struktury. Dále byly provedeny simulace navrhovaných struktur. Bylo zjištěno, že t_{Si} je jedním z nejdůležitějších faktorů určujících vlastnosti PEH. Při tloušťkách t_{Si} od 10 μm do 30 μm dosahují PEH nejvyšších výchylek, generovaného napětí a nejnižších frekvencí, které by mohly být využitelné v reálném životě. Při tlustším t_{Si} jsou tyto parametry horší – lineární závislost vykazuje pouze zvyšování f_r . Ostatní veličiny (Y a V_{oc}) mají nelineární charakter.

V další části byly navrženy a vyrobeny struktury PEH. Při výrobě se objevilo několik nových problémů, mezi nimiž byl tzv. ARDE – jev při kterém dochází k rychlejšímu leptání velkých ploch než úzkých čar. Tento problém jsem vyřešil předleptáním struktur z vrchní strany do větší hloubky. Poté již nedocházelo k proleptávání větších ploch dříve, než se wafer rozpadnul na jednotlivé čipy. Přínos mojí výrobní metody spočívá v redukci potřebných masek na výrobu a tím i urychlení a zlevnění celkového procesu. Tento proces obsahuje pouze 4 litografie, v porovnání s literaturou, kde se často dostávají na 5 a více.

Poslední část se věnuje charakterizaci PEH. Bohužel díky problémům ve výrobě byl změřen pouze jeden čip o tlustém $t_{Si} \approx 133$ μm . Tato tloušťka posunula rezonanční frekvenci až na 6035 Hz. I přes velkou tloušťku nosníku bylo dosaženo dobrých výsledků z hlediska P_{Max} , který při buzení hodnotou 39 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ dosáhl hodnoty $\approx 0,56$ μW . Měřením bylo ověřeno, že závislost generovaného výkonu na amplitudě buzení je lineární. Struktura dosahovala nejvyšších výkonových zisků při odporové zátěži v rozmezí 20 $\text{k}\Omega$ až 40 $\text{k}\Omega$. Budoucí práce by mohla navazovat na tuto v několika ohledech. Prvním je charakterizace co nejtenčích vyrobených struktur (≈ 10 μm), s čímž souvisí optimalizace především leptacího procesu v DRIE. Druhou oblastí by mohlo být zjednodušení výrobního procesu na 3 litografie, což přinese další výzvu z oblasti technologického procesu. Třetí výzvou by mohlo být vytvoření optimálního usměrňovacího obvodu, který by několikanásobně zvýšil získaný výkon.

LITERATURA

- [1] SUN, Hongwen, Minqi YIN, Wangtong WEI, Jiacheng LI, Haibin WANG a Xin JIN. MEMS based energy harvesting for the Internet of Things: a survey. *Microsystem Technologies* [online]. 2018, **24**(7), 2853–2869. ISSN 0946-7076, 1432-1858. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-018-3763-z
- [2] XUE, Xinyu, Sihong WANG, Wenxi GUO, Yan ZHANG a Zhong Lin WANG. Hybridizing Energy Conversion and Storage in a Mechanical-to-Electrochemical Process for Self-Charging Power Cell. *Nano Letters* [online]. 2012, **12**(9), 5048–5054. ISSN 1530-6984, 1530-6992. Dostupné z: doi:10.1021/nl302879t
- [3] LEE, Ju-Hyuck, Jeonghun KIM, Tae Yun KIM, Md Shahriar AL HOSSAIN, Sang-Woo KIM a Jung Ho KIM. All-in-one energy harvesting and storage devices. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2016, **4**(21), 7983–7999. ISSN 2050-7488, 2050-7496. Dostupné z: doi:10.1039/C6TA01229A
- [4] MORI, Takao a Shashank PRIYA. Materials for energy harvesting: At the forefront of a new wave. *MRS Bulletin* [online]. 2018, **43**(03), 176–180. ISSN 0883-7694, 1938-1425. Dostupné z: doi:10.1557/mrs.2018.32
- [5] SONG, JunDong a Jin WANG. Ferroelectric materials for vibrational energy harvesting. *Science China Technological Sciences* [online]. 2016, **59**(7), 1012–1022. ISSN 1674-7321, 1869-1900. Dostupné z: doi:10.1007/s11431-016-6081-7
- [6] XIAO, Shaoqing a Shuyan XU. High-Efficiency Silicon Solar Cells—Materials and Devices Physics. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* [online]. 2014, **39**(4), 277–317. ISSN 1040-8436, 1547-6561. Dostupné z: doi:10.1080/10408436.2013.834245
- [7] YAN, Jiabin, Xiaoping LIAO, Deyang YAN a Youguo CHEN. Review of Micro Thermoelectric Generator. *Journal of Microelectromechanical Systems* [online]. 2018, **27**(1), 1–18. ISSN 1057-7157, 1941-0158. Dostupné z: doi:10.1109/JMEMS.2017.2782748
- [8] SEBALD, Gael, Daniel GUYOMAR a Amen AGBOSSOU. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, **18**(12), 125006. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/18/12/125006
- [9] BOWEN, C. R., J. TAYLOR, E. LÉBOULBAR, D. ZABEK, A. CHAUHAN a R. VAISH. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy & Environmental Science* [online]. 2014, **7**(12), 3836–3856. ISSN 1754-5706. Dostupné z: doi:10.1039/C4EE01759E
- [10] TIAN, Wenchao, Zongyu LING, Wenbo YU a Jing SHI. A Review of MEMS Scale Piezoelectric Energy Harvester. *Applied Sciences* [online]. 2018, **8**(4), 645. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8040645
- [11] KHAN, Farid Ullah a Muhammad Usman QADIR. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2016, **26**(10), 103001. ISSN 0960-1317, 1361-6439. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/26/10/103001
- [12] ZHAO, Xingqiang, Jun CAI, Ying GUO, Chunbiao LI, Junlei WANG a Hengwei

- ZHENG. Modeling and experimental investigation of an AA-sized electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Smart Materials and Structures* [online]. 2018, **27**(8), 085008. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/aacdc4
- [13] PARK, Jae Yeong. Piezoelectric MEMS Energy Harvesters. In: *Micro Energy Harvesting* [online]. B.m.: Wiley-Blackwell, 2015 [vid. 2018-11-06], s. 201–222. ISBN 978-3-527-67294-3. Dostupné z: doi:10.1002/9783527672943.ch10
- [14] DEFAY, Emmanuel, Sébastien BOISSEAU a Ghislain DESPESSE. Piezoelectric Materials for Energy Harvesting. In: *Micro Energy Harvesting* [online]. B.m.: Wiley-Blackwell, 2015 [vid. 2018-11-06], s. 123–148. ISBN 978-3-527-67294-3. Dostupné z: doi:10.1002/9783527672943.ch7
- [15] FEI, Chunlong, Xiangli LIU, Benpeng ZHU, Di LI, Xiaofei YANG, Yintang YANG a Qifa ZHOU. AlN piezoelectric thin films for energy harvesting and acoustic devices. *Nano Energy* [online]. 2018, **51**, 146–161. ISSN 22112855. Dostupné z: doi:10.1016/j.nanoen.2018.06.062
- [16] NARITA, Fumio a Marina FOX. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetolectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2018, **20**(5), 1700743. ISSN 14381656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201700743
- [17] HOU, R, D HUTSON a K J KIRK. Development of sputtered AlN thin-film ultrasonic transducers for durable high-temperature applications. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* [online]. 2013, **55**(6), 302–307. ISSN 1354-2575. Dostupné z: doi:10.1784/insi.2012.55.6.302
- [18] KUROKAWA, F., R. YOKOKAWA, H. KOTERA, F. HORIKIRI, K. SHIBATA, T. MISHIMA, M. SATO a I. KANNO. Micro fabrication of lead-free (K,Na)NbO₃ piezoelectric thin films by dry etching. *Micro Nano Letters* [online]. 2012, **7**(12), 1223–1225. ISSN 1750-0443. Dostupné z: doi:10.1049/mnl.2012.0570
- [19] KHAN, Asif, Zafar ABAS, Heung SOO KIM a Il-Kwon OH. Piezoelectric thin films: an integrated review of transducers and energy harvesting. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, **25**(5), 053002. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/25/5/053002
- [20] BARTH, Stephan, Hagen BARTZSCH, Daniel GLÖß, Peter FRACH, Thomas MODES, Olaf ZYWITZKI, Gunnar SUCHANECK a Gerald GERLACH. Magnetron sputtering of piezoelectric AlN and AlScN thin films and their use in energy harvesting applications. *Microsystem Technologies* [online]. 2016, **22**(7), 1613–1617. ISSN 1432-1858. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-015-2787-x
- [21] DU, Sijun, Yu JIA, Chun ZHAO, Gehan A. J. AMARATUNGA a Ashwin A. SESHIA. A Passive Design Scheme to Increase the Rectified Power of Piezoelectric Energy Harvesters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2018, **65**(9), 7095–7105. ISSN 0278-0046, 1557-9948. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2018.2798567
- [22] LIU, Yiming, Geng TIAN, Yong WANG, Junhong LIN, Qiming ZHANG a Heath F. HOFMANN. Active Piezoelectric Energy Harvesting: General Principle and Experimental Demonstration. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2009, **20**(5), 575–585. ISSN 1045-389X. Dostupné

z: doi:10.1177/1045389X08098195

- [23] KLEMPA, Jaroslav. *Piezelektrické rezonátory MEMS pro senzorické aplikace* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 52 s., 2017. Vedoucí bakalářské práce Ing. Imrich Gablech. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/102981>
- [24] ELFRINK, R., T. M. KAMEL, M. GOEDBLOED, S. MATOVA, D. HOHLFELD, Y. van ANDEL a R. van SCHAIJK. Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2009, **19**(9), 094005. ISSN 0960-1317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/19/9/094005
- [25] ELFRINK, R., M. RENAUD, T. M. KAMEL, C. de NOOIJER, M. JAMBUNATHAN, M. GOEDBLOED, D. HOHLFELD, S. MATOVA, V. POP, L. CABALLERO a R. van SCHAIJK. Vacuum-packaged piezoelectric vibration energy harvesters: damping contributions and autonomy for a wireless sensor system. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2010, **20**(10), 104001. ISSN 0960-1317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/20/10/104001
- [26] ALAMIN DOW, Ali B., Achim BITTNER, Ulrich SCHMID a Nazir P. KHERANI. Design, fabrication and testing of a piezoelectric energy microgenerator. *Microsystem Technologies* [online]. 2014, **20**(4), 1035–1040. ISSN 1432-1858. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-014-2116-9
- [27] RICART, T., P. LASSAGNE, S. BOISSEAU, G. DESPESE, A. LEFEVRE, C. BILLARD, S. FANGET a E. DEFAY. Macro energy harvester based on Aluminium Nitride thin films. In: *2011 IEEE International Ultrasonics Symposium: 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium* [online]. 2011, s. 1928–1931. Dostupné z: doi:10.1109/ULTSYM.2011.0480
- [28] LIU, Huicong, Chengkuo LEE, Takeshi KOBAYASHI, Cho Jui TAY a Chenggen QUAN. A new S-shaped MEMS PZT cantilever for energy harvesting from low frequency vibrations below 30 Hz. *Microsystem Technologies* [online]. 2012, **18**(4), 497–506. ISSN 1432-1858. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-012-1424-1
- [29] AKTAKKA, E. E., R. L. PETERSON a K. NAJAFI. A CMOS-compatible piezoelectric vibration energy scavenger based on the integration of bulk PZT films on silicon. In: *2010 International Electron Devices Meeting: 2010 International Electron Devices Meeting* [online]. 2010, s. 31.5.1-31.5.4. Dostupné z: doi:10.1109/IEDM.2010.5703459
- [30] ZHU, Guang, Aurelia C. WANG, Ying LIU, Yusheng ZHOU a Zhong Lin WANG. Functional Electrical Stimulation by Nanogenerator with 58 V Output Voltage. *Nano Letters* [online]. 2012, **12**(6), 3086–3090. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl300972f
- [31] KUNZ, J., J. FIALKA, P. BENES a Z. HAVRANEK. An Automated measurement system for measuring an overall power efficiency and a characterisation of piezo harvesters. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2018, **1065**, 202008. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1065/20/202008

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Vize pro EH.	2
Obr. 1.2: Znázornění struktury FV panelu	2
Obr. 1.3: Struktura vertikálního μ -TEG	3
Obr. 1.4: Příklad EMEH velikosti AA tužkové baterie [12].....	5
Obr. 1.5: Princip EEH využívající elektret	5
Obr. 2.1: Piezoelektrický jev a) přímý, b) obrácený	6
Obr. 2.2: Proces pólování a) před, b) po procesu	7
Obr. 2.3: Rozložení elektrod a) interdigitální elektrody budicí materiál v módu d_{31} b) paralelní elektrody budicí materiál v módu d_{33}	9
Obr. 2.4: Krystalová struktura PZT	9
Obr. 2.5: Krystalová struktura AlN	10
Obr. 2.6: Mechanický model PEH	11
Obr. 2.7: Piezoelektrický člen s rezistivní zátěží	13
Obr. 2.8: a) zapojení usměrňujícího obvodu, b) časové průběhy I_P a V_{PC} v čase.....	13
Obr. 2.9: a) Zapojení SSHI obvodu, b) časové průběhy I_P , V_P a Φ_F	14
Obr. 3.1: a) 2D řez strukturou PEH, b) znázornění pohybu PEH uvnitř pouzdra [24]	15
Obr. 3.2: a) Vyrobený PEH se senzorem teploty a řídicími obvody, b) znázornění závislosti P_{Max} na velikosti vakua [25].....	16
Obr. 3.3: 3D model navrhovaného PEH [26].....	16
Obr. 3.4: Struktura PEH ve tvaru S, horní pohled.....	17
Obr. 4.1: Časový průběh vibrací z kapoty auta [13]	19
Obr. 4.2: Struktura PEH včetně detailu popisující rozložení vrstev	20
Obr. 4.3: Spojení kvazi-statické a elektrostatické analýzy přes piezoelektrickou matici e	21
Obr. 4.4: Závislost f_r na tloušťce závaží na konci jednostranně vetknutého nosníku	22
Obr. 4.5: Porovnání naměřených hodnot rezonančních frekvencí, červenou barvou je měřená kapacita pro Keysight E4990A, modrou barvou je měřené napětí na vstupu zesilovače MFLI.....	23
Obr. 4.6: Porovnání naměřených průběhů mezi simulací a zesilovačem MFLI	23
Obr. 4.7: Harmonická analýza PEH bez závaží a se závažím o tloušťce 10 μ m	24
Obr. 4.8: Parametrický 3D model PEH se znázorněním počátečních podmínek.....	25
Obr. 4.9: Závislost f_r na tloušťce strukturního Si při různých tloušťkách waferu.....	26
Obr. 4.10: Závislost Y a V_{OC} na frekvenci	27
Obr. 4.11: Závislost V_{OC} na t_{Si} v porovnání s f_r při jednotlivých tloušťkách	27

Obr. 4.12: Závislost V_{OC} na tloušťce AlN	28
Obr. 5.1: Design čipů v programu KLayout – fialová barva znázorňuje první litografii, šedá druhou litografii a černá barva třetí litografii (čtvrtá litografie není pro přehlednost zobrazena).....	29
Obr. 5.2: Schématické rozložení Kaufmanova IBS se sekundárním zdrojem	30
Obr. 5.3: Difrakční záznam provedených AlN experimentů	31
Obr. 5.4: a) závislost hodnoty pnutí na tloušťce AlN, b) diamantová struktura bez prohýbání, c) řez $\approx 1 \mu\text{m}$ AlN vrstvou	32
Obr. 5.5: a) výchozí sendvičová struktura Si/Ti/AlN/Ti, b) 1. litografie – vytvarování PEH, c) depozice 500 nm Al, d) 2. litografie – tvarování vrchní a spodní elektrody, e) 3. litografie – vyleptání prohlubní z vrchní strany, f) 4. litografie – vyleptání prohlubní ze spodní strany a ztenčení struktury PEH	33
Obr. 5.6: a) Dosažené rozlišení motivu při první litografii s použitím FR AZ 5214 E, b) detail struktur	34
Obr. 5.7: a) Wafer před leptáním vrchní Al vrstvy a AlN, b) wafer po leptacím procesu.....	35
Obr. 5.8: a) Detail sesazovacích značek (diamant v kruhu), b) spodní čtvercová elektroda, označení struktur a vrchní elektroda	36
Obr. 5.9: a) Wafer s 500 nm Al s litografií připravený k leptání, b) wafer po leptání Al v RIE	36
Obr. 5.10: a) Wafer před DRIE z vrchní strany s vyvolaným motivem, b) detail vyleptaného a očištěného čipu	37
Obr. 5.11: a) sesazená čtvrtá litografie ze zadní strany, b) jednotlivé čipy po leptání.....	37
Obr. 5.12: a) Rozložení celého čipu, b) detail na PEH – tloušťka závaží je stejná jako tloušťka čipu	38
Obr. 5.13: a,b) fotografie vyrobených čipů z optického mikroskopu, c-f) detaily struktur čipů	39
Obr. 6.1: Blokové schéma Michelsonova interferometru	41
Obr. 6.2: Záznam interferenčních proužků na osciloskopu při rezonanci.....	42
Obr. 6.3: Závislost polohy a velikosti rezonanční špičky na velikosti budícího napětí	42
Obr. 6.4: Uchycení pouzdra a akcelerometru na vibračním stolku, na čipu můžeme pozorovat zaměřený laserový svazek z PDV 100 na konec PEH	43
Obr. 6.5: Blokové schéma měřicí stanice.....	43
Obr. 6.6: Frekvenční charakteristika PEH při buzení $4,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	44
Obr. 6.7: Výkonová charakteristika PEH při buzení hodnotou $4,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. $P_{\text{max}} = 0,144 \mu\text{W}$...	44
Obr. 6.8: Závislost P_{Max} na zrychlení A	45
Obr. 6.9: Průběh výkonu při poškození struktury	45

SEZNAM ZKRATEK

APDL	ANSYS Parametric Design Language, ANSYS parametrický skriptovací jazyk
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, technologie kov-oxid polovodič
CS	Command Snippet, útržky kódu
DRIE	Deep Reactive Ion Etching, reaktivní hloubkové leptání
EEH	Electrostatic Energy Harvesting, Electrostatický Energetický Harvesting
EH	Energy harvesting, energetický harvesting
EMEH	Electromagnetic energy harvesting, elektromagnetický energetický harvesting
FoM	Figure of Merit, měřítko vlastností
FR	Fotorezist
FV	Fotovoltaický
HMDS	Hexametyldisilazan
IBC	Ion beam current, Proud iontového svazku
IBE	Ion beam energy, Energie iontového svazku
IBS	Ion beam source, Zdroj iontového svazku
ITO	Indium Tin Oxide – oxid indio-cinátý
LCC68	Leadless chip carrier, Bevývodové keramické pouzdro s 68 kontakty
NMP	1-Methylpyrrolidin-2-on
PČ	Piezoelektrický člen
PEH	Piezoelectric energy harvesting, Piezoelektrický energetický harvesting
PMMA	Polymethylakrylát
PZT	Olovo-zirkonát-titanát (PZT - $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$)
RIE	Reactive Ion Etching, Reaktivní iontové leptání
SEM	Scanning Electron Microscope, Rastrovací elektronový mikroskop
SSHI	Synchronized Switching on Inductor, Synchronizované spínání na indukčnosti
TEG	Thermo Electric Generator, Termoelektrický generátor
XRD	X-ray diffractography, rentgenová difrakografie

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

A	Zrychlení
b_e	Elektrické tlumení
b_m	Mechanické tlumení
c^E	Materiálová matice poddajnosti
C_P	Kapacita piezoelektrického materiálu
D	Vektor výchylky
d_{ij}	Piezoelektrický nábojový koeficient
E	Elektrické pole
e_{ij}	Piezoelektrická konstanta
f_r	Rezonanční frekvence
g_{ij}	Piezoelektrická napěťová konstanta
I_P	Proud z piezoelektrického materiálu
k_p	Elektromechanický koeficient
k_t	Elektromechanický vazební koeficient
L	Vzdálenost mezi elektrodami
P_{Max}	Maximální generovaný výkon
Q	Faktor kvality
Q_T	Celkový generovaný náboj
R_Z	Zatěžovací odpor
S	Mechanické natažením S
s^D	materiálovou kompilační matici za konst. D
T/2	Půl perioda
T_c	Curieho teplota
V	Napětí
V_D	Dopředné napětí diody
V_{OC}	Napětí naprázdno
V_{PČ}	Napětí na piezoelektrickém členu
V_S	Napětí na úložném kapacitoru
Y	Youngův modul pružnosti
β	Dielektrická tuhost 1/ε
ε	Permitivita
ε^S	materiálová dielektrická konstanta za konst. T
ζ_e	Elektrické tlumení
ζ_m	Mechanické tlumení
ζ_T	Celkové tlumení
σ_{ij}	Mechanické Pnutí