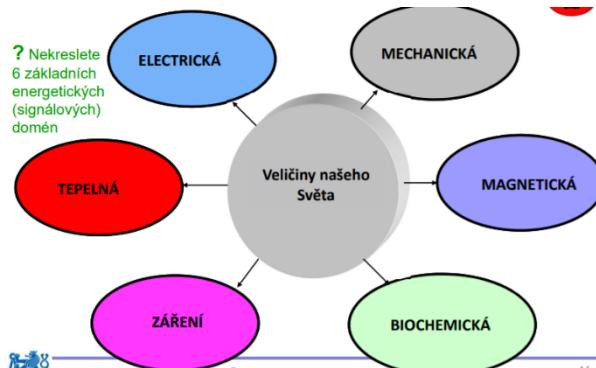


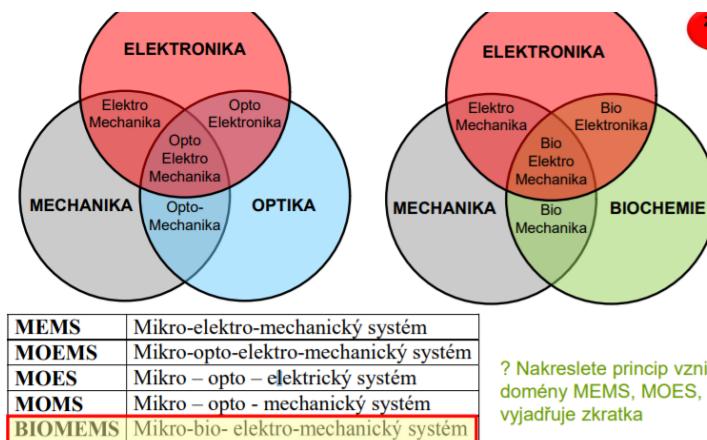
MNS – OTÁZKY KE ZKOUŠCE

ÚVOD DO MIKROSYSTÉMŮ A NANOSYSTÉMŮ

1. Nakreslete a popište 6 základních energetických (signálových) domén obklopujících nás reálný svět



2. Nakreslete princip vzniku domény MEMS, MOES, co vyjadřuje zkratka



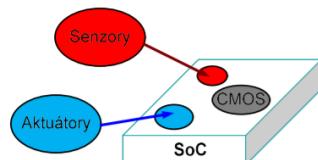
3. Evropská definice mikrosystému - definujte alespoň 3 z 5 základních požadavků na mikrosystém

- Spojení – dvou nebo více signálových domén
- Funkce – snímání > zpracování signálů > akční funkce
- Rozměry – mikro až nano metry
- Vybavený – jistým stupněm inteligence
- Realizace – mikrosystémové technologie, integrace na jednom nebo více čipech

4. Uveďte 3 základní funkce mikrosystému

- Snímání informace – vstup (senzory)
- Zpracování signálů (DSP nebo ASP)
- Akční funkce – výstup (aktuátory)

5. Nakreslete princip vzniku SoC (System-on-Chip) a vysvětlete význam



ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ JEVY VYUŽÍVANÉ V MIRKOSYSTÉMECH

6. Podélný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište rovnicemi

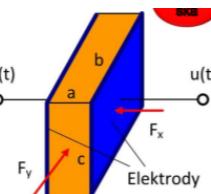
Podélný piezoelektrický jev (primární)

působením síly F_x ve směru elektrické osy x .

Vektor polarizace P_e je rovnoběžný s osou x a je úměrný působícímu mechanickému tlaku

$$P_e = k_p p_x = k_p \frac{F_x}{S_x}$$

k_p je piezoelektrická konstanta.



Na každé stěně kolmé k elektrické ose vznikne elektrický náboj

$$Q_x = P_e S_x = k_p F_x$$

napětí na elektrodách

$$U_x = \frac{Q_x}{C} = \frac{k_p}{C} F_x = k_u F_x$$

? Podélný piezoelektrický jev:
nakreslete princip vzniku podélného
piezoelektrického jevu, jev popište
rovnicemi

kde k_u je napěťová citlivost piezoelektrického elementu

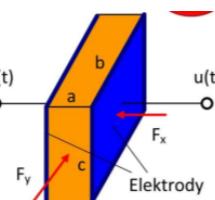
7. Příčný piezoelektrický jev: nakreslete princip vzniku podélného piezoelektrického jevu, jev popište rovnicemi

Příčný piezoelektrický jev (primární)

vzniká působením síly F_y ve směru

mechanické osy y . Vektor polarizace působí rovněž rovnoběžně s osou x , ale má opačný směr

$$P_e = -k_p p_y = -k_p \frac{F_y}{S_y}$$



Pro náboj na elektrodách

$$Q_x = P_e S_x = -k_p \frac{F_y S_x}{S_y} = -k_p \frac{b}{a} F_y$$

? Příčný piezoelektrický
jev: nakreslete princip
vzniku podélného
piezoelektrického jevu, jev
popište rovnicemi

napětí na elektrodách

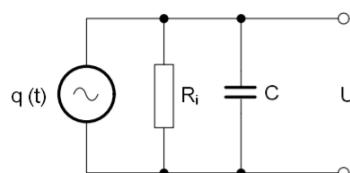
$$U_x = \frac{Q_x}{C} = -\frac{k_p b}{C a} F_y = k_u \frac{b}{a} F_y$$

kde k_u je napěťová citlivost piezoelektrického elementu

8. Piezoelektrický jev: nakreslete elektrické náhradní schéma piezoelektrického zdroje náboje (napětí)

Náhradní elektrický obvod (generátor elektrického náboje)

- C je dáná geometrickou kapacitou mezi elektrodami
- R_i je svodový odpor elementu
- Mechanická veličina působí dynamicky s frekvencí menší než je vlastní (mechanická) frekvence piezoelektrického elementu
- Piezoelektrické elementy se používají pro realizaci senzorů a aktuátorů do frekvence 105 Hz.



? Piezoelektrický jev:
nakreslete elektrické
náhradní schéma
piezoelektrického zdroje
náboje (napětí)

9. Piezoodporový jev: nakreslete princip objemové deformace, napište základní rovnici popisující objemovou deformaci z hlediska změny odporu materiálu při deformaci

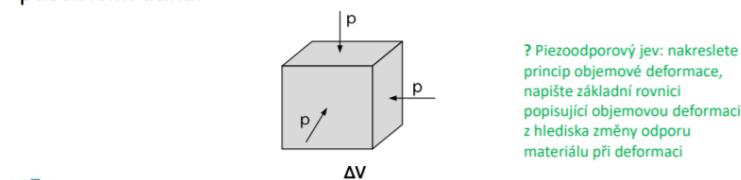
Objemová deformace

Vzniká při působení mechanické síly současně na všechny tři osy (x, y, z), tj. těleso je v prostředí s tlakem p

Změna elektrického odporu piezoodporového elementu

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha p$$

α je tlakový součinitel, u většiny materiálů závislý na teplotě i na působícím tlaku.



10. Piezoodporový jev: nakreslete princip podélné deformace, napište základní rovnici popisující podélnou deformaci z hlediska změny odporu materiálu při deformaci

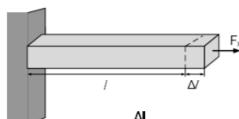
Podélná deformace

vzniká působením mechanického namáhání v jedné ose

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$$

K vyjadřuje součinitel deformační citlivosti

Δl je změna délky piezoodporového elementu v ose namáhání (síly)



11. Bolometrický jev: vysvětlete (nakreslete) princip bolometrického jevu, napište základní rovnici popisující jev

- Dopadající infračervené záření způsobí změnu ohmického odporu bolometrického elementu (polovodiče), objem bolometru je malý
- Na výstupu bolometrického elementu napájeného proudem I je změna výstupního napětí

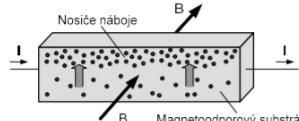
$$\Delta U = I \cdot \Delta R = I \cdot \alpha R \cdot \Delta T$$

α je teplotní koeficient odporu bolometrického elementu

ΔT změna teploty bolometrického elementu vlivem záření

12. Magnetoodporový jev: vysvětlete princip magnetoodporového jevu, nakreslete princip magnetoodporového senzoru

- Vzniká v elektricky vodivých magnetických materiálech
- Působením vnějšího magnetického pole kolmého k proudovým siločarám dochází ke stáčení magnetizačního vektoru v magnetoodporovém elementu a tímto i proudových siločar, což ve výsledku představuje změnu ohmického odporu elementu



- Ohmický odpor se mění s druhou mocninou magnetické indukce B , při magnetických polích $B < 0,1 \text{ T}$, změnu lze vyjádřit dle vztahu

$$R = R_o \frac{\rho}{\rho_o} (1 + \mu_n^2 B^2) \rightarrow R = fce(B^2)$$

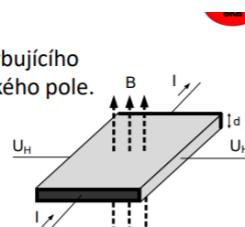
kde μ_n je pohyblivost elektronů.

13. Hallův jev: nakreslete princip Hallova jevu, napište základní rovnici popisující chování Hallova senzoru z hlediska výstupního signálu

- Objeven 1879 Hallem
- Jev je založen na vzájemném působení pohybujícího se elektrického náboje a vnějšího magnetického pole.
- Na elektron působí síla

$$F = qvB$$

q je jednotkový náboj elektronu,
 v je rychlosť pohybu elektronu
 B je magnetická indukce.



- elektron je magnetickým polem odchylkován na stranu (záporný potenciál) – vznik přičného Hallova napětí U_H .
- Polarity napětí je závislá na směru průtoku proudu a současně směru magnetické indukce.

? Hallův jev: nakreslete princip Hallova jevu, napište základní rovnici popisující chování Hallova senzoru z hlediska výstupního signálu

$$U_H = \frac{R_H}{d} BI$$

R_H je Hallova konstanta
 B je magnetická indukce
 d je tloušťka Hallova elementu
 I je proud procházející Hallovým elementem

14. Seebeckův jev: nakreslete princip Seebeckova jevu, napište základní rovnici popisující chování Seebeckova jevu, pojmenujte senzor, kde se využívá Seebeckův jev

- Spojení dvou vodičů z různých elektricky vodivých materiálů do uzavřeného obvodu
- Různá teplota spojů, obvodem protéká elektrický proud.
- Ve vodiči se vytvoří elektrické pole

$$dU = \alpha \cdot \frac{dT}{dx} dx$$

dT je teplotní přírůstek na délce dx (platí pro malé délky)
 α je absolutní Seebeckův koeficient materiálu

Pro homogenní materiálu je Seebeckův koeficient konstantní v celé délce materiálu, lze zjednodušit

$$dU = \alpha \cdot dT$$

? Seebeckův jev: nakreslete princip Seebeckova jevu, napište základní rovnici popisující chování Seebeckova jevu, pojmenujte senzor, kde se využívá Seebeckův jev

- Pokud se spojí chladný a studený konec stejným materiálem se vyrovná systém z hlediska rozložení teplénné energie.
- Obě větve smyčky jsou stejné a proto se kompenzují účinky a obvodem neprotéká žádný proud.
- Různé materiály mají jinou hodnotu absolutního Seebeckova koeficientu, jejich propojením lze vytvořit tzv. diferenciální Seebeckův koeficient

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$$

α_A, α_B jsou absolutní Seebeckovy koeficienty materiálů

Napěťový rozdíl spojení dvou materiálů

$$dU_{AB} = \alpha_{AB} dT$$

15. Peltierův jev: definujte princip Peltierova jevu, uveďte příklady jeho využití

Změna ohřevu nebo ochlazování (absorpce tepla) je funkcí procházejícího proudu I

$$dQ = \pm pIdt$$

dQ	změna tepla
p	koefficient reprezentující termoelektrické vlastnosti materiálu, nezávislý na teplotě, vyjádřen v jednotce elektrického napětí.
I	proud elementem
t	čas

16. Magnetostriktivní jev: vysvětlete princip magnetostriktivního jevu, napište rovnici pro vyjádření síly, vysvětlete členy rovnice

- Působením *magnetického pole dochází ke změně geometrických rozměrů materiálu* (v principu podobný jevu piezoelektrickému)
- Koefficient d udává citlivost *relativní změny geometrických rozměrů* způsobenou změnou intenzity magnetického pole (H)

$$d = \frac{d\epsilon}{dH} \quad \begin{matrix} \epsilon \text{ relativní změna rozměru materiálu} \\ H \text{ je intenzita magnetického pole} \end{matrix}$$

- V magnetickém poli dojde k souhlasnému natočení magnetických domén ve směru pole a tím k expanzi materiálu ve směru pole a ke smrštění ve směru kolmém.
- Přestože je smrštění menší než expanze, používá se právě **smrštění** jako zdroj pohybu.
- Účinnost piezomagnetických materiálů se blíží účinnosti piezoelektrických (lze však získat mnohem větší sílu).
- Pro dosažení větší síly se používají **vícevrstvové** systémy
- Typickým materiélem je **FeCoAg** (využívaný v magnetronu).

Síla vytvořená strukturou

$$F \approx dwH$$

d je koefficient změny geometr. rozměru
 w je šířka vrstvy
 H je intenzita magnetického pole

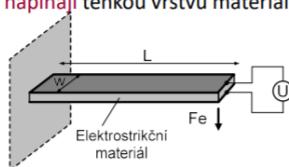
? Magnetostriktivní jev:
 vysvětlete princip
 magnetostriktivního jevu,
 napište rovnici pro
 vyjádření síly, vysvětlete
 členy rovnice

17. Elektrostriktivní jev: nakreslete a definujte princip elektrostriktivního jevu, napište vyjádření síly F , parametry, na kterých závisí

- Princip - Působením elektrostatických sil generovaných volným nábojem na povrchu materiálu dochází k jeho geometrické deformaci.**
- Princip činnosti je **podobný elektrostatickému**, kde místo vzduchové mezery je umístěn elektrostriktivní materiál.
- Výsledné elektrostatické síly **stahují a napínají** tenkou vrstvu materiálu.
- Pro výslednou sílu struktury platí

$$F = \epsilon \frac{Lw}{2d^2} U^2$$

ϵ je permitivita elektrostriktivního materiálu
 d je tloušťka elektrostriktivní vrstvy
 w je šířka elektrostriktivní vrstvy



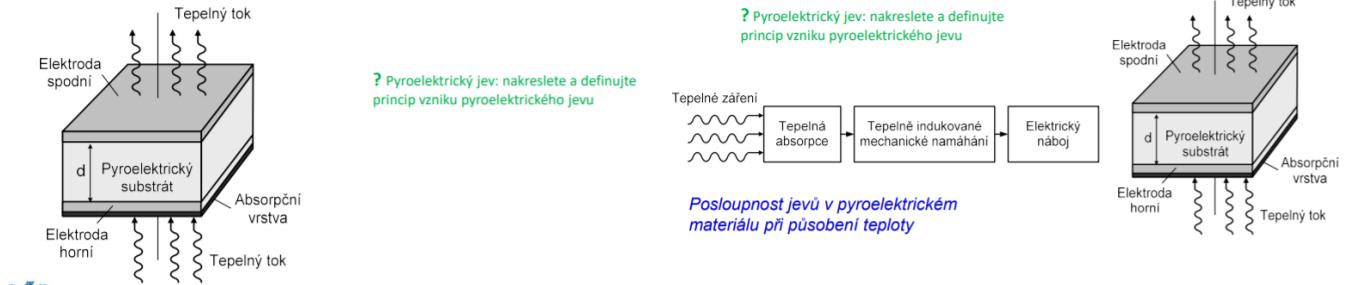
? Elektrostriktivní jev: nakreslete a definujte princip elektrostriktivního jevu, napište vyjádření síly F , parametry, na kterých závisí

Vlastnosti jevu:

- Elektrostriktivní jev **není duální**.
- Na rozdíl od piezoelektrického jevu **se změnou polarity elektrického pole se nemění směr** generované síly F .
- Elektrostriktivní jev je u všech materiálů, iak krystalických tak i ostatních.**

18. Pyroelektrický jev: nakreslete a definujte princip vzniku pyroelektrického jevu

- Pyroelektrický jev - materiály, které generují Q jako odezvu na tepelný tok
- Změny teploty vyvolávají změny polarizačního vektoru, což je doprovázeno posuvnými proudy a změnami napětí
- Tvar pyroelektrického senzoru - tenká destička s elektrodami ke snímání tepelně indukovaného náboje (podobné piezoelektrickému)



19. Pyroelektrický jev: význam Curie teploty a jak se projeví

- Pyroelektrický senzor – je v podstatě kondenzátor, nepotřebuje žádné vnější napájení, tj. jedná se o aktivní senzor
- Vyhodnocení signálu - elektronické obvody pro zpracování náboje
- Pyroelektrický materiál generuje náboje v důsledku změny teploty, není schopný činnosti ve statickém režimu (teplota konstantní)
- Pyroelektrický materiál – model s velkým množstvím částeček, které mají elektrické dipoly náhodně orientované
- Působením teploty vyšší než je Curie teplota - částečky ztrácí dipolový moment (elektrickou orientaci) – mez použití

? Pyroelektrický jev: význam Curie teploty a jak se projeví

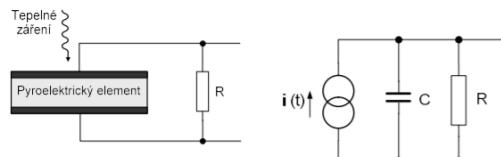
Mechanismy způsobující pyroelektrickou orientaci působením tepelného toku

- Primární jev (nejdůležitější) - způsoben tepelným roztažováním a smršťováním jednotlivých dipólů
- Sekundární jev - důsledek piezoelektrického jevu, ke kterému dochází prodlužováním a smršťováním dipolových částeček, tj. objevuje se zde navíc piezoelektrické napětí

- Pyroelektrický element má největší citlivost v bodě Curie teploty

20. Pyroelektrický jev: nakreslete náhradní elektrické zapojení pyroelektrického elementu (senzoru)

Pyroelektrický senzor - ekvivalentní elektrický obvod



- Rezistor R zahrnuje vnitřní odporové ztráty v pyroelektrickém materiálu.
- Procházející elektrický proud rezistorem R a napětí na něm reprezentují tepelně indukovaný náboj.

21. Triboelektrický jev: definujte princip triboelektrického jevu

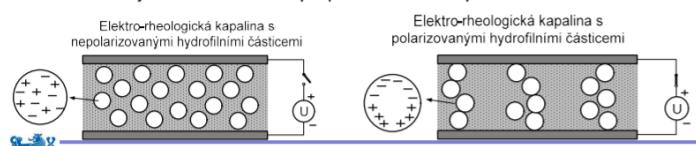
- Materiál získá elektrický náboj poté, co přijde třením do kontaktu s jiným materiélem
- Většina statické elektřiny je způsobena triboelektrickým jevem
- Triboelektrická řada – materiály jsou uváděny v pořadí polarit přenosu náboje, když přijdou do kontaktu s jiným objektem
 - Čím větší vzdálenost materiálů v řadě, tím větší náboj mezi sebou vytvoří
 - Pokud jsou blízko sebe, předají si malý nebo žádný náboj

22. Elektrorheologický jev: nakreslete a definujte princip elektrorheologického jevu

Princip

- Kondenzátor s elektrodami mezi kterými protéká tekutina s dielektrickými a polovodičovými částicemi s rozmezí 0,04 μm až 50 μm.
- Při U se pevné částice polarizují a uspořádají se v řetězce mezi kladnou a zápornou elektrodu, tj. vytvářejí „můstky“ napříč tekutinou mezi elektrodami.
- Vytvořené můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou (zvyšuje se dynamická viskozita).
- Proces je reversibilní, po odpojení U se můstky rozpadnou.
- Třecí síly jsou porovnatelné s hydraulickými silami.
- Typická $E = 2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, při $E = 4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ se třecí vlastnosti tekutiny blíží pevným látkám.
- Maximální E je určena dielektrickým průrazem tekutiny.

? Elektrorheologický jev:
nakreslete a definujte princip
elektrorheologického jevu



PARAMETRY AKČNÍCH ČLENŮ

23. Napište základní typy parametrů charakterizující aktuátor (3 typy), Vymenujte alespoň 5 základních statických parametrů charakterizujících aktuátor

- Statické, dynamické, prostředí
- Statické – přesnost, rozlišovací schopnost, citlivost, selektivita, práh citlivosti, práh měření, linearita, zkreslení, hystereze, reprodukovatelnost, rozsah měření, šum, výstupní impedance, zemění, izolace, nestabilita a drift

24. Aktivní a pasivní aktuátor: Definujte aktivní (generátorový) a pasivní (modulátorový) aktuátor. Napište obecné rovnice popisující chování aktivního a pasivního aktuátoru. Uveďte příklady pasivního a aktivního aktuátoru.

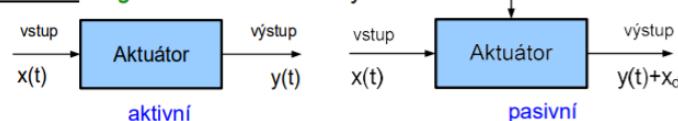
Aktuátor - systém se vstupem $x(t)$ a výstupem $y(t)$.

Aktivní aktuátor - vytváří výstupní energii signálu $y(t)$ pomocí energie vstupního signálu $x(t)$.

Příklad: piezoelektrické aktuátory.

Pasivní aktuátor - potřebuje ke své činnosti další pomocnou energii např. elektrické napájení.

Příklad: magnetostriční aktuátory.

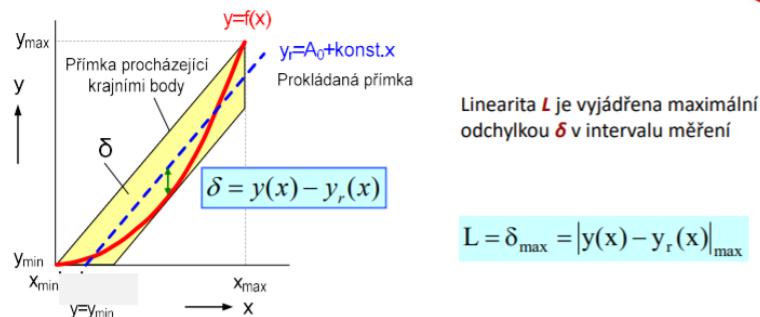


Obecná rovnice popisující chování aktivního (generátorového) prvku Obecná rovnice chování pasivního (modulačního) prvku

$$y(t) = fce(x(t))$$

$$y(t) = fce(x(t) + x_d(t))$$

25. Nelinearity aktuátoru: Definujte linearitu L (nelinearity) aktuátoru, nakreslete obrázek vzniku nelinearity L a popište rovnici



Linearita **L** je vyjádřena maximální odchylkou **δ** v intervalu měření

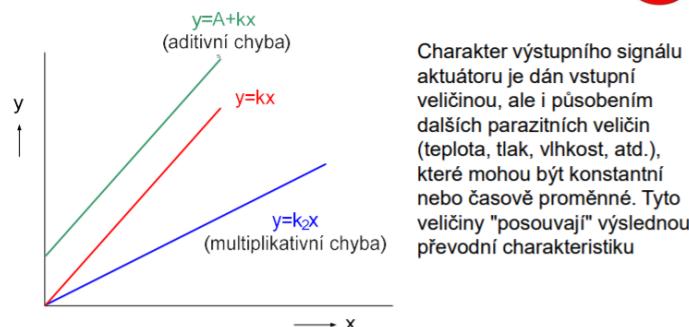
? Nelinearity aktuátoru: Definujte linearitu L (nelinearity) aktuátoru, nakreslete obrázek vzniku nelinearity L a popište rovnici

$$L = 100 \frac{|y(x) - y_r(x)|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} (\%)$$

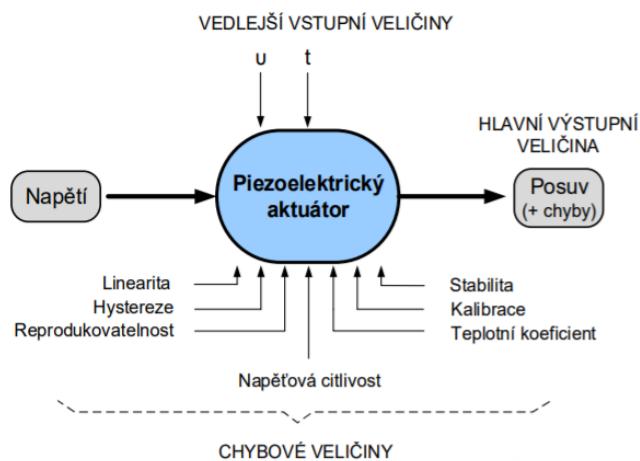
$y_r(x)$ referenční přímka

$y(x)$ skutečný průběh výstupní veličiny

26. Aditivní a multiplikativní chyba aktuátoru: Nakreslete vznik multiplikativní a aditivní chyby aktuátoru



27. Příčiny vzniku chyb aktuátoru: Nakreslete zjednodušeně chybové vlivy na výstupní signál aktuátoru



28. Napište matematický vztah pro vybranou definici přesnosti aktuátoru

Přesnost (relativní chyba mikroaktuátoru)

$$\varepsilon_a = 100 \frac{y_m - y_t}{y_t} (\%)$$

y_m je výstupní akční hodnota (měřená)
 y_t je teoretická hodnota výstupní veličiny

Přesnost působení aktuátoru vztaženou k plnému rozsahu FSO

$$\varepsilon_f = 100 \frac{y_m - y_t}{y_{FSO}} (\%)$$

FSO ... Full Scale Output

Plný rozsah působení aktuátoru lze definovat vztahem

$$y_{FSO} = y_{\max} - y_{\min}$$

? Napište matematický vztah pro vybranou
definici přesnosti aktuátoru

29. Napište rovnice pro rozlišení a průměrné rozlišení aktuátorů

Rozlišení - R (resolution)

Rozlišení označuje nejmenší možnou změnu výstupní veličiny způsobenou vybuditelnou změnou vstupní veličiny.

$$R_{\max} = 100 \frac{\Delta y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} (\%)$$

Δy_{\min} je nejmenší možný přírůstek výstupní akční veličiny
 $(y_{\max} - y_{\min})$ - rozsah výstupní veličiny aktuátoru

Průměrné rozlišení - R_{av} (%)

Průměrná hodnota rozlišení v celém rozsahu výstupní akční veličiny

$$R_{av} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{\sum_{i=1}^n (y_{i\max} - y_{i\min})} (\%)$$

n počet úseků

Δy_i - nejmenší přírůstek výstupní akční veličiny v pracovním rozsahu ($y_{\max} - y_{\min}$)

Pro shodné intervaly zjednodušení

$$R_{av} = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i}{n(y_{\max} - y_{\min})} (\%)$$

? Napište rovnice pro rozlišení a průměrné rozlišení aktuátorů

30. Napište rovnice pro citlivost, selektivitu a selektivitu multiaktuátorového systému

Citlivost

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

platí v daném pracovním bodě Po

Selektivita

$$S_\alpha = \frac{\Delta y_\alpha}{\Delta x} /$$

y_α akční fyzikální veličina α

S_α je citlivost na akční veličinu α

Selektivita multiaktuátorového systému $S_{\alpha\beta}$

Citlivost působení aktuátoru β na veličinu α v prostředí s více fyzikálními nebo biochemicalickými

$$S_{\beta\alpha} = \frac{\Delta y_\alpha}{\Delta x_\beta} /$$

Δy_α - změna výstupní veličiny aktuátoru β při působení na fyzikální nebo biochemicalickou veličinu α .

α - veličina na kterou působí aktuátor

β - β -itý aktuátor

31. Napište rovnici popisující definici minimálního akčního výstupního signálu aktuátoru

Minimální akční výstupní signál - y_{SIO} (SIO = Smallest inducible output)

Minimální výstupní (akční) signál je udán hodnotou výstupní veličiny aktuátoru, která se rovná celkovému vlastnímu šumu aktuátoru

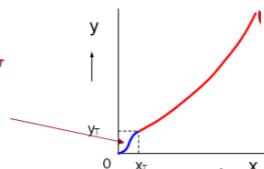
$$y_{SIO} = \sqrt{u_s^2}$$

u_s je šumové napětí

32. Nakreslete, jak je definován pracovní rozsah aktuátoru, Práh akčního působení aktuátoru

Práh akčního působení aktuátoru - y_T

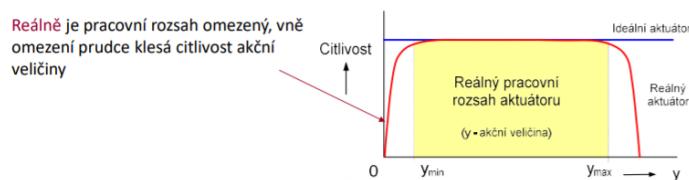
Určený nejmenší hodnotou výstupní akční veličiny y_T (měřeno od nuly), která je způsobena vstupní budící veličinou x_T (prahová hodnota bývá nejčastěji důsledkem nonlinearity v okolí nuly)



Pracovní rozsah aktuátoru

Rozsah výstupní proměnné akční veličiny ($y_{max} - y_{min}$), která je jednoznačně určena vstupní budicí veličinou x

Ideální aktuátor působí na prostředí v rozsahu vstupních veličin od $y=0$ do $y \rightarrow$:



Reálně je pracovní rozsah omezen, vně omezení prudce klesá citlivost akční veličiny

33. Scaling faktor: napište matematický výraz pro „scaling faktor“ při zmenšování rozměrů

Změna velikosti rozměrů - S_c (Scaling)

S_c vyjadřuje změnu vlastností aktuátoru při geometrické změně rozměrů

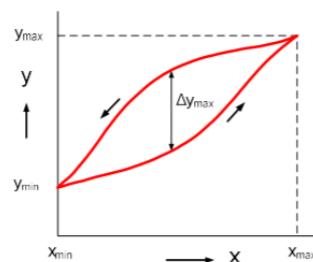
$$S_c = -\frac{d\eta}{dV}$$

η účinnost

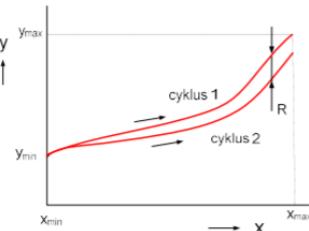
V geometrický objem aktivních částí aktuátoru

34. Nakreslete princip vzniku hysteréze a reprodukovatelnosti u aktuátoru

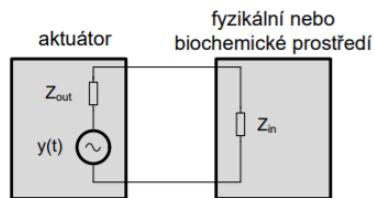
Hysteréze



Reprodukčnost



35. Nakreslete náhradní elektrický model aktuátoru s ekvivalentním napěťovým výstupem a připojením zátěže, Napište podmínky mezi výstupní impedancí aktuátoru a vstupní impedancí zátěžového prostředí

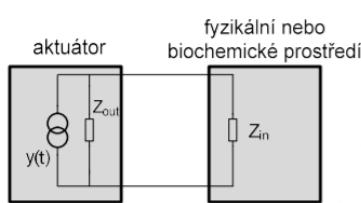


Aktuátor s nezatíženým výstupem

$$Z_{in} \geq Z_{out}$$

Výstupní impedance udává, jakým způsobem může být výstup aktuátoru zatěžován následujícími obvody. Jedná se o obecnou impedanci výstupu aktuátoru, respektive impedanci vstupu prostředí (většinou prostředí není elektrické)

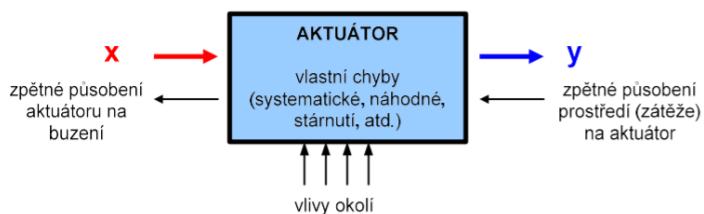
36. Nakreslete náhradní elektrický model aktuátoru s ekvivalentním proudovým výstupem a připojením zátěže, Napište podmínky mezi výstupní impedancí aktuátoru a vstupní impedancí zátěžového prostředí



Aktuátor se zatíženým výstupem

$$Z_{in} \leq Z_{out}$$

37. Nakreslete model aktuátoru jako black-box s příkladem vlivů vstupních, výstupních faktorů, vlivů okolí a vlastních chyb aktuátoru



TEPLOVNÍ SENZORY

38. Odporové kovové teplotní senzory (RTD): Uveďte alespoň 2 typické materiály pro teplotní senzory, uveďte typický teplotní rozsah, napište základní rovnici pro approximaci průběhu odporu v malém rozmezí teplot (0 - 100°C)

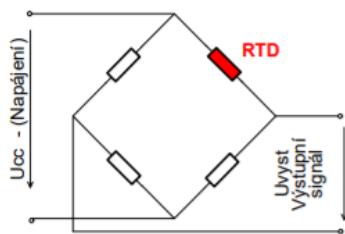
- **materiál:** především čisté kovy (Pt, Ni, Cu ...)
- **W** (vysoce lineární)
- **Cu** menší teplotní rozsahy
- **Ni** (nižší teploty, nízká cena, nelineární), $-60^{\circ}\text{C} + 120^{\circ}\text{C}$
- **Pt** (vysoká cena, lineární, nejběžnější, $-260^{\circ}\text{C} + 630^{\circ}\text{C}$)
- **slitinu Ni** (nižší teploty, nízká cena)
- **slitinu Ag, Au** do 120°C
- **závislost $R=f(\vartheta)$** není lineární i když většinou se za lineární považuje

$$R = R_0 (1 + \alpha \vartheta + \beta \vartheta^2 + \gamma (\vartheta - 100) \vartheta^3)$$

Pro malé rozsahy teplot se rovnice zjednoduší

Poznámka: RTD patří k nejčastějším typům pro měření teploty

39. Vyhodnocování signálu z odporových kovových teplotních senzorů (RTD): Nakreslete zjednodušeně obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty



40. Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory: Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty

Typy termistorů

PTC (pozistory)

NTC (negistory)

Vyhodnocování informace o změně teploty

Wheatstoneův můstek

Teplotní koeficient odporu

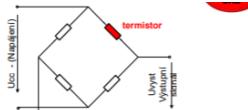
$$\alpha = -\frac{B}{T^2}$$

Teplotní závislost odporu

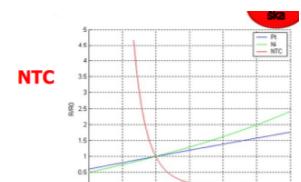
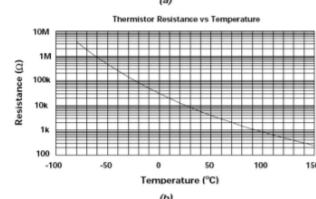
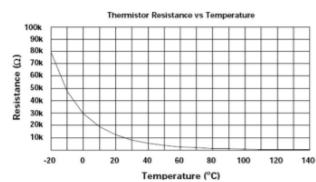
$$R = Ae^{-\frac{B}{T}} \Rightarrow \Delta R = R_0 \alpha \Delta T$$

B – materiálová teplotní konstanta

A – zahrnuje geometrický tvar materiálu (udává výrobce ze dvou hodnot R_1 pro T_1 , R_2 pro T_2)



? Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory: Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.



? Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory: Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.

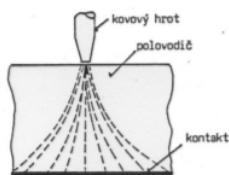
41. Odporové polovodičové teplotní senzory monokrystalické : Nakreslete a vysvětlete základní principy činnosti.

Polovodičové senzory Si monokrystalické

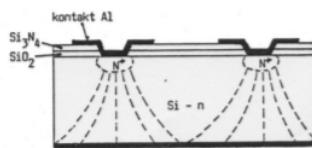
Princip – odpor šíření se uplatňuje v místě styku kovového hrotu s polovodičem. Odpor pak závisí pouze na rezistivitě ρ a poloměru kontaktu r .

$$R=f(r, \rho)$$

Využívá se kladný teplotní součinitel (pro Si od $-50 \div 150^\circ\text{C}$). S rostoucí teplotou klesá pohyblivost volných nosičů náboje.



Princip teplotního senzoru pracujícího na principu odporu šíření



Praktické uspořádání senzoru teploty

42. Teplotní senzory s p-n přechodem: Napište základní rovnici popisující proud přechodem (Shockley rovnice), Napište nebo odvoďte rovnici pro teplotní závislost napětí na přechodu p-n na teplotě

Pro měření lze využít všech diod (Si, Ge, GaAs) charakteristika je mírně nelineární (**Varikap** – nejlepší, stálé parametry)

Proud diodou

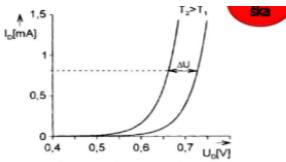
$$I = I_S \left(e^{\left(\frac{U}{nKT} \right)} - 1 \right) \Rightarrow U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_S}$$

n – parametr, rekombinační koeficient

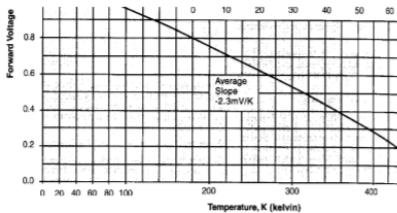
I_S – saturační proud

U, I – napětí a proud v propustném směru

? Teplotní senzory s p-n přechodem: Napište základní rovnici popisující proud přechodem (Shockley rovnice), Napište nebo odvoďte rovnici pro teplotní závislost napětí na přechodu p-n na teplotě.



$\Rightarrow U = \text{konst} \cdot T$ pokud $I_S = \text{konst.}$, v reálu ale $I_S = f(T) \Rightarrow U \neq \text{konst} \cdot T$ – charakteristika je obecně nelineární



43. Citlivost teplotních senzorů s p-n přechodem: Napište princip odvození citlivosti p-n přechodu, Napište typickou číselnou hodnotu citlivosti

Citlivost – lze odvodit, že platí

$$\beta = \frac{dU}{dT} = \frac{k}{nq} \ln \frac{I}{I_S}$$

$$U = \frac{kT}{n} \ln \frac{I}{I_S}$$

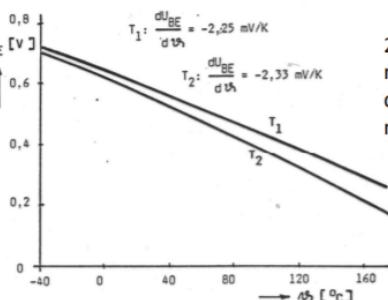
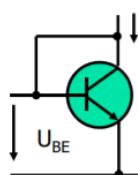
Příklad

pro běžné Si je $I_S = 10^{-10} \text{ A}$ a $I = 10^{-4} \text{ A}$

je $\beta = -2,1 \text{ mV.K}^{-1}$

44. Teplotní senzory s p-n přechodem: Nakreslete typický průběh teplotní závislosti napětí na přechodu p-n $U = f(\text{teplota})$ pro dva různé proudy I přechodem

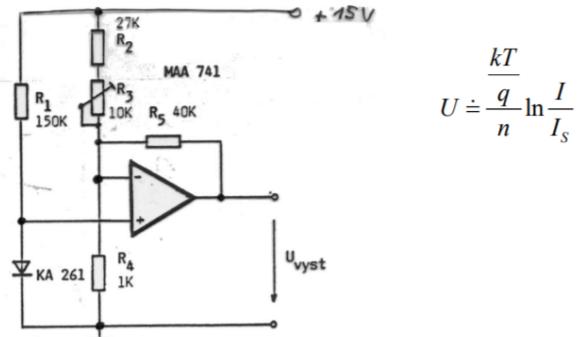
V praxi se využívá přechod U_{BE} (oproti diodě), protože má menší teplotní závislost saturačního proudu



2 p-n přechody (tranzistory) nejsou zaměnitelné – každý diskrétní senzor teploty se musí navrhovat individuálně

45. Vyhodnocování informace z teplotního senzoru s p-n přechodem: Nakreslete zjednodušené základní zapojení teploměru s přechodem p-n, vysvětlete proč je nutné používat proudový zdroj pro napájení přechodu p-n, jak je tvořen proudový zdroj na Vašem obrázku

Základní zapojení jednoduchého převodníku T/U



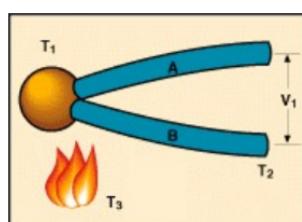
46. Termoelektrické kovové teplotní senzory: nakreslete a vysvětlete základní princip činnosti termočlánku

Princip:

Dva různé kovy (eventuálně polovodiče) spojené svařením, pájením nebo výjimečně mechanicky

Seebeckův jev

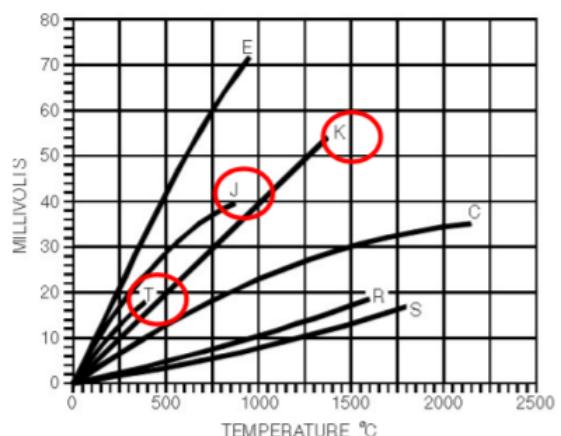
jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu T₁ a T₂, protéká obvodem elektrický proud. Pokud obvod rozpojíme, na svorkách naměříme elektromotorické napětí.



? Termoelektrické teplotní senzory:
nakreslete a vysvětlete základní

47. Termoelektrické teplotní senzory: Uveďte 3 základní typy kovových termočlánků. Uveďte typické materiály, Nakreslete 3 typické charakteristiky.

- Výběr materiálu záleží na:
 - Teplotním rozsahu
 - požadované přesnosti
 - Požadované chemické odolnosti
 - Odolnosti vůči mechanickému opotřebení a vibracím
 - Požadavky na instalaci (velikost drátu)
- Chromel-Constantan (E křivka)
 - Pro použití pro teploty vyšší než 870°C ve vakuu nebo inertním prostředi. Při záporných teplotách nekoruje. Tento termočlánek májí nejvyšší výstupní napětí ze všech standardních kovových termočlánků.
- Platinum-Rhodium (S a R křivka)
 - Mají velkou odolnost proti oxidaci a korozi
 - Doporučený rozsah pracovních teplot je 1540°C.
- Wolfram-Rhodium (C křivka)
 - Používají se pro měření teplot vyšších než 2760°C.

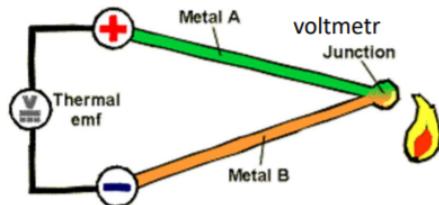


48. Termoelektrické teplotní senzory: Nakreslete zjednodušený princip elektronického zapojení pro vyhodnocování signálu z termočlánků

Princip:

- Měření výstupního napětí termočlánku
- Měření voltmetrem

Princip vyhodnocování teploty

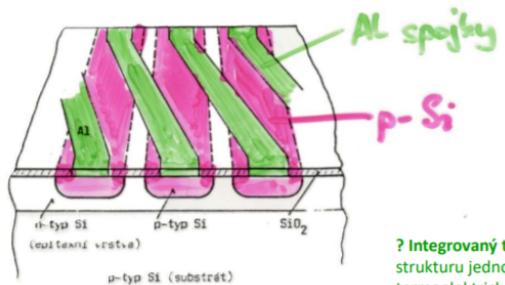


49. Integrovaný termoelektrický článek: Nakreslete strukturu článku. Nakreslete princip termoelektrická baterie. Jak je zabráněno šíření teploty na čipu.

Využití:

Termoelektrické články lze využít k měření teplotních rozdílů přímo na křemíkovém čipu ⇒ lze měřit teplotu na různých místech uvnitř čipu najednou

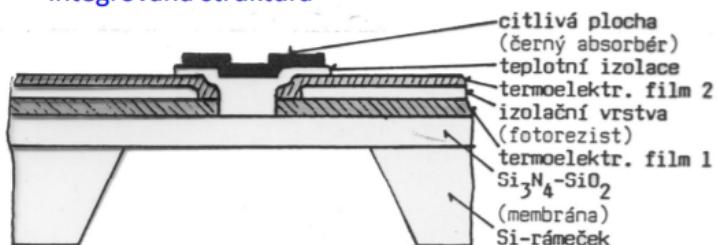
Termoelektrická baterie



? Integrovaný termoelektrický článek: Nakreslete strukturu jednoho článku. Nakreslete princip termoelektrická baterie. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu

50. Bezkontaktní senzory infračerveného záření s termoelektrickým článkem: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho termočlánku na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu

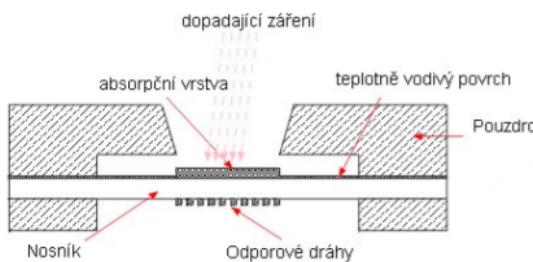
Termoelektrická integrovaná struktura



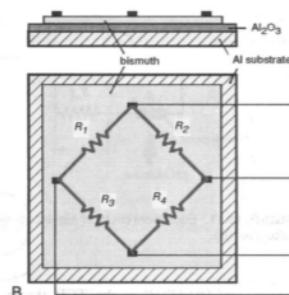
Schematický řez termoblokem vyrobeným mnohavrstvovou technologií

51. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho MEMS bolometru na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu.

Provedení jednoduchého bolometru MEMS

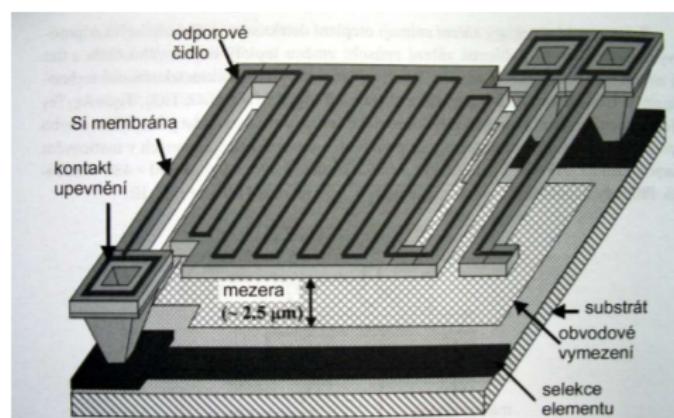
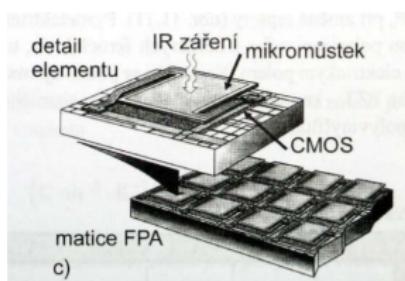


Struktura integrovaného můstku z bolometru



52. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu bolometrické matice na čipu

Uspořádání plošného detektoru používaného v termovizních kamerách



53. Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů. Jaké nevýhody mají termočlánkové, Do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít.

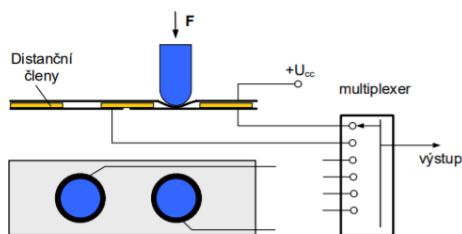
- Termoelektrické články, odporové senzory, kapacitní teplotní senzory, indukční princip, šumový teplotní senzor, P-N přechod
- TČ: teplotní rozsah materiálů
- 0,05K

TAKTILNÍ SENZORY A DOTYKOVÉ displeje

54. Kontaktové taktilní senzory – nakreslete princip činnosti, nakreslete vyhodnocování signálu.

- Využívají se pro zjišťování přítomnosti dotyku, popř. pro měření jeho síly nebo tlaku
- Nejjednodušší jsou kontaktové s výstupním logickým signálem

Kontaktové taktilní senzory



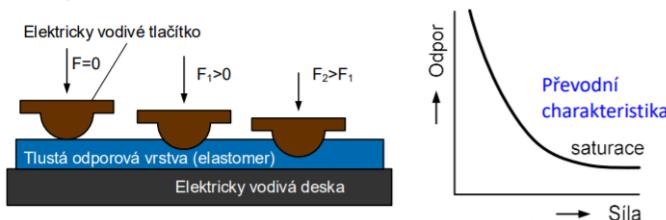
Princip činnosti

- Dvě pružné vrstvy prostorově oddělené distančními členy
- Působením vnější síly dojde k elektrickému propojení horní a dolní vodivé vrstvy
- Výstupní logický signál je ve tvaru logické jedničky (dotyk) nebo logické nuly (dotyk není)

55. Taktilelní senzor s odporovou tlustou vrstvou (elastomerem) - nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu.

Princip

- Materiály, které mění svůj odpor deformací (vodivé elastomery (makromolekulární látky) vyrobené z Si pryže, polyuretanu a dalších látek)
- Princip činnosti elastomerového taktilního senzoru je založený na změně kontaktní plochy nebo tloušťky
- Při měření lze použít takový maximální tlak, při kterém se převodní charakteristika dostává do saturace (citlivost se blíží nule)
- **Vyhodnocování informace** – metody měření odporu
- **Nevýhoda:** relativně velká tloušťka $\approx 1 \text{ mm}$.



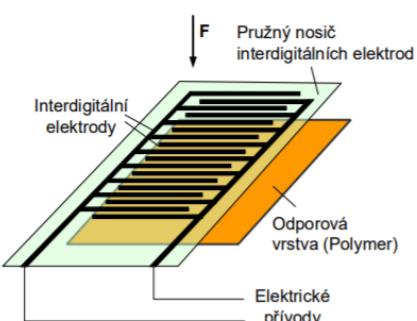
56. Taktilelní senzor s odporovou tenkou polymerovou vrstvou a prstovou kontaktní strukturou – nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu.

Princip

- Polovodivé polymery mění odpor působení tlaku nebo síly
- Senzor ve tvaru membránového spínače - interdigitační struktura jako jedna vrstva, polovodivý polymer jako druhou vrstvu

Vlastnosti

- velký dynamický rozsah
- velmi malá přesnost ($\pm 10\%$)
- velmi nízká cena
- typická tloušťka senzoru $250 \mu\text{m}$



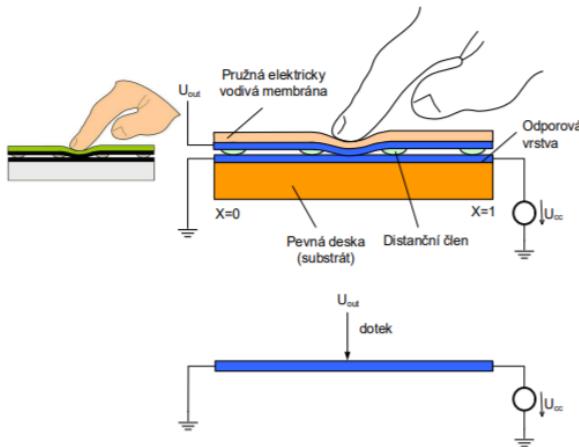
57. Dotykové displeje 2D s odporovým principem - nakreslete princip činnosti, nakreslete princip vyhodnocování signálu

Pružná membrána s odporovou vrstvou, průhyb membrány vytvoří kontakt s další odporovou vrstvou, vytvoření odporového děliče, vyhodnocení výst. signálu - napětí

1. fáze: Výstupní napětí z odporového děliče U_{OUT} určuje souřadnice x

2. fáze: Výstupní napětí z odporového děliče U_{OUT} určuje souřadnice y

$$x = \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{cc}} \quad y = \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{cc}}$$



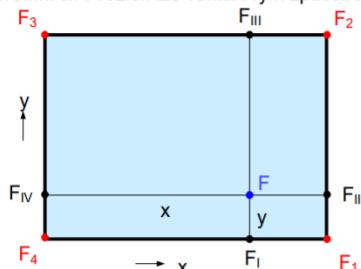
58. Princip vektorového rozkladu určení souřadnic x a y těžiště - nakreslete princip určení souřadnic x, y těžiště sil

Princip – určení souřadnic x a y těžiště sil

Na destičku působí síla F

Senzory v rozích měří F_1, F_2, F_3, F_4

Změřením sil v rozích lze vektorovým způsobem určit souřadnice x, y



Princip – určení souřadnic x a y jako výpočet těžiště, např. výpočet sil 2D
Na destičku působí síla F

Senzory v rozích měří F_1, F_2, F_3, F_4

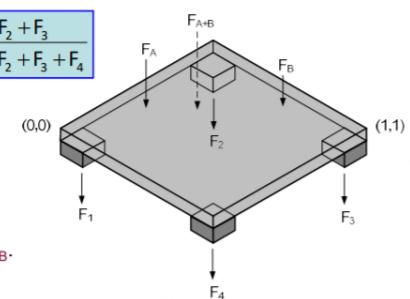
Působení jednoduché síly $F_A - x$ a y lze určit podle rovnice

$$x = \frac{F_3 + F_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad y = \frac{F_2 + F_3}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

Při působení více sil

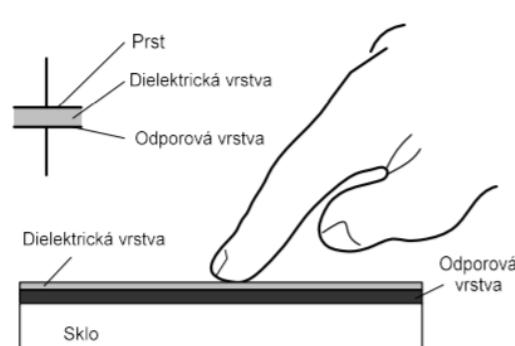
např. ještě F_B

z naměřených hodnot F_1 až F_4 spočítat těžiště celkové síly $F_A + F_B$.

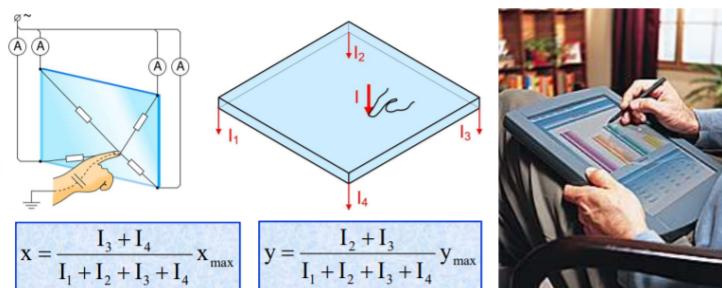


59. Dotykové displeje 2D s elektrickým polem a kapacitou – nakreslete princip vektorového rozkladu elektrického pole pro určení souřadnic x a y dotyku.

- Spodní elektroda – odporová vrstva na skle
- Horní elektroda – prst
- Dielektrická vrstva – odděluje obě vodivé elektrody (kondenzátor)
- proud protéká kapacitou mezi prstem a dolní elektrodou
- Napájení střídavým zdrojem s frekvencí kHz



- Proud protéká odporovou vrstvou do 4 rohů dolní elektrody
- Proud je v rozích měřený, vektorově lze určit polohu x,y (podobně jak u silového 2D senzoru)
- Měří pouze 1 dotyk



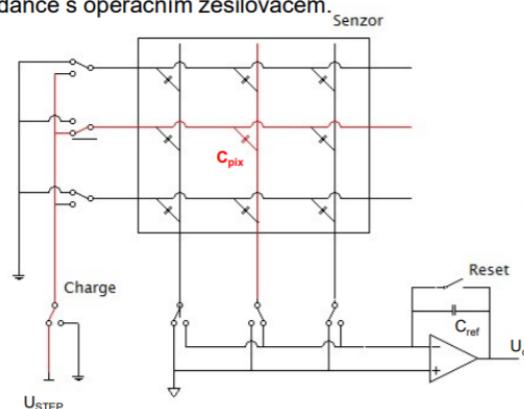
60. Kapacitní vícedotykový displej 2D - nakreslete zjednodušené elektrické zapojení pro určení souřadnic x, y.

Velikost kapacity v každém místě displeje je zjišťována průběžně při sepnutí příslušných spínačů podél obou os a je měřena pomocí známého zapojení pro měření impedance s operačním zesilovačem.

Pro C_{pix} platí :

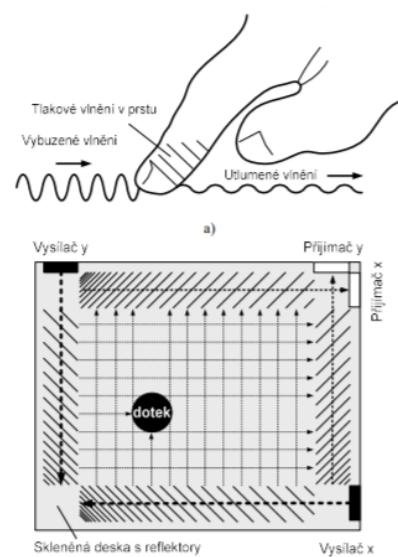
$$\Delta U_o = -\Delta U_{step} \frac{C_{pix}}{C_{ref}}$$

C_{ref} je známá referenční kapacita



61. Ultrazvukový vícedotykový displej 2D – nakreslete princip činnosti.

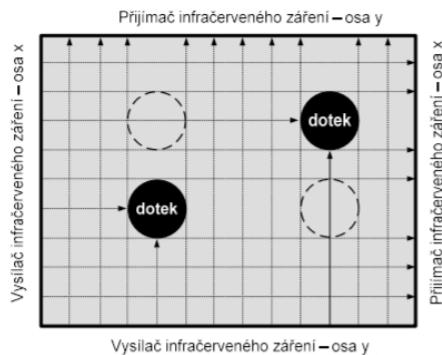
- Dotyk prstu způsobí absorci části energie šířícího se vlnění (Rychlosť šírenia ve skle $\approx 3160 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, na vlhké kůži $\approx 1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).
- Pracovní frekvence jsou $\approx 5 \text{ MHz}$
- **Výhoda** - velmi jednoduché uspořádání a možná realizace na zakřiveném povrchu
- Vlnění prochází soustavou odražečů natočených o úhel 45°
- Vlnění dopadá na druhé straně displeje na další soustavu odražečů otočených opět o úhel 45°
- Odtud se směruje na přijímací senzor
- Stejně uspořádání je i pro osu y
- Je vytvořeno maticové uspořádání, kde informace o geometrických souřadnicích dotyku x a y jsou vytvořeny výpočtem zpoždění jednotlivých dopadajících paprsků vlnění vůči vysílacímu ultrazvukovému senzoru



62. Infračervený vícedotykový displej 2D – nakreslete princip činnosti.

Princip činnosti

- Vytvoření mřížky IR záření, zdroj IR = LED, přijímač = fototranzistor
- V místě dotyku jsou cesta IR přerušena
- Souřadnice polohy – určení x a y v místě přerušení paprsku

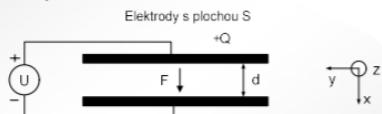


ELEKTROSTATICKÝ PRINCIP - NANOMANIPULÁTORY

63. Napište rovnici pro výpočet energie akumulované v kondenzátoru s kapacitou C, Napište vztah pro obecný 3D výpočet síly mezi elektrodami kondenzátoru C.

Elektrostatická energie W_c (v kondenzátoru C):

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2 \quad Q = CU \quad Q = It$$



Coulombovská síla F (mezi elektrodami kondenzátoru C, přitažování opačně nabitých těles):

Obecná síla 3D působící na desky je rovna gradientu energie W_c

$$F = \nabla W_c$$

64. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohybem elektrod vůči sobě, vyznačte směr působení síly, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození síly mezi elektrodami kondenzátoru C, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

Princip: napětí na kondenzátoru konstantní a vrchní deska je pohyblivá jen ve směru osy x.

Elektrody s plochou S

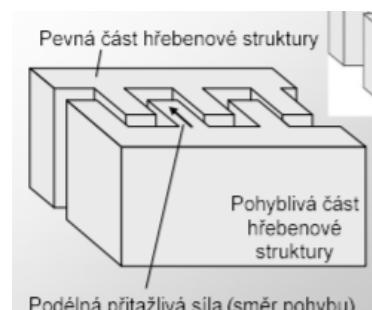
$F_x = \frac{dW_c}{dx} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{d^2} U^2$

$C = \epsilon \frac{S}{d}$

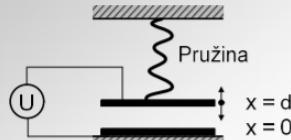
$W_c = \frac{1}{2} CU^2$

$F = \nabla W_c$

S je plocha desek kondenzátoru
d je jejich vzájemná vzdálenost.



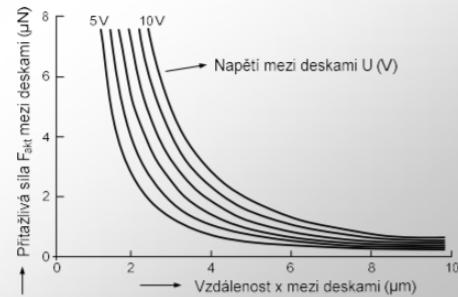
Zátež aktuátoru: modelována pomocí pružiny. Síla aktuátoru F_{akt} působí proti síle pružiny F_{pruz} (zátež)



Přitažlivá síla elektrod kondenzátoru (aktuátoru)

$$F_{akt} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{x^2} U^2$$

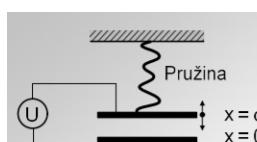
x označuje aktuální vzdálenost mezi elektrodami



Příklad

Silové působení kondenzátoru
 $S=100 \mu\text{m}^2$, $d=10 \mu\text{m}$,
 pružinová konstanta $k=5 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$
 Parametr $U=5 \text{ V}$ až $U=10 \text{ V}$ s krokem 1 V .

65. Napište rovnici pro sílu pružiny F_{pruz} , napište výchozí rovnici pro odvození rovnováhy mezi elst. aktuátorem a pružinou jako záteží.



Rovnováha mezi aktuátorem a pružinou

Síla pružiny proti elektrodě kondenzátoru

Síla pružiny: $x=d$ je 0, $x=0$ je max
 Síla kondenz: $x=d$ je 0, $x=0$ je max

Poznámka: lze nalézt rovnovážnou polohu x pro jakoukoli hodnotu přiloženého napětí U nebo naopak lze z této rovnosti odvodit velikost napětí, které je nutné pro vytvoření vzdálenosti x .

$$\begin{aligned} F_{pruz} &= F_{akt} \\ F_{pruz} &= k(d-x) \\ F_{akt} &= \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{x^2} U^2 \\ U &= \sqrt{\frac{2k(d-x)x^2}{\epsilon S}} \end{aligned}$$

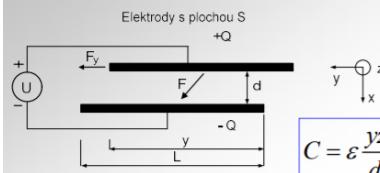
? Napište rovnici pro sílu pružiny F_{pruz} . Napište výchozí rovnici pro odvození rovnováhy mezi elst. aktuátorem a pružinou jako záteží

Energie systému: Aktuátor-pružina se skládá z přitažlivé síly působící na aktuátor a síly působící na pružinu

$$W_c = \frac{1}{2} C U^2 \quad W_{celk} = \frac{1}{2} k(d-x)^2 - \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{x} U^2$$

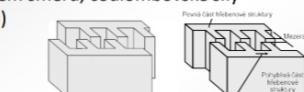
66. Nakreslete model kapacitního aktuátoru se stříhovým pohybem elektrod (vzdálenost elektrod se nemění), vyznačte směr působení síly, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození síly působící na elektrody, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

Princip – při zamezení pohybu elektrod v podélném směru, coulombovské síly pohybují deskami kondenzátoru připojené (ve střihu)



Poznámka - Pro $y < L$ a pro $y > L$ není tato síla závislá na překrytí desek y a pro $y=L$ je síla F_y nulová. Síla F_y změní znaménko v okamžiku, kdy se hodnota y blíží k délce L. Při podrobnější analýze tohoto problému, zahrnující rozptyl pole, lze najít přesnější závislost síly F_y na souřadnici y.

Poznámka - V elektrických lineárních mikromotorech je přítomnost kolmé síly velice nevhodná, vzhledem k tomu, že rotor má pak tendenci se "přilepit" na stator. Je nutné mezi rotor a stator umístit izolační vrstvu k zamezení elektrického kontaktu mezi rotorem a statorem



Elektrostatická síla ve směru y

$$F_y = \frac{dW_c}{dy} = \frac{d\left(\frac{1}{2} C U^2\right)}{dy} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{z}{d} U^2$$

z je rozměr desky ve směru osy z
 d je jejich vzájemná vzdálenost.
 y je překrytí desek

? Nakreslete model kapacitního aktuátoru se stříhovým pohybem elektrod (vzdálenost elektrod se nemění), vyznačte směr působení síly, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození síly působící na elektrody, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

67. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohybem dielektrika, vyznačte působení síly v aktuátoru, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození působící síly na dielektrikum, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

Princip - desky kondenzátoru pevné (stator) a dielektrikum pohyblivé (rotor), dielektrikum je v závislosti na intenzitě elst pole vtahováno mezi elektrody

$$F_y = \frac{dW_c}{dy} = \frac{1}{2}(\epsilon_d - \epsilon_0) \frac{z}{d} U^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{z}{d} U^2$$

Derivací W_c lze odvodit velikost síly F_y , která vtahuje dielektrikum mezi desky

2 paralelní kondenzátory

$$C_{vzduchu} = \epsilon_0 \frac{(L-y)z}{d} \quad C_{dielektrika} = \epsilon_d \frac{yz}{d} \quad \text{pro } d' \equiv d$$

$$C = C_{vzduchu} + C_{dielektrika}$$

Energie v kondenzátoru

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \frac{Lz}{d} + (\epsilon_d - \epsilon_0) \frac{yz}{d} \right) U^2$$

? Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohybem dielektrika, vyznačte působení síly v aktuátoru, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození působící síly na dielektrikum, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

68. Nakreslete model kapacitního aktuátoru s pohyblivou vodivou prostřední elektrodou, vyznačte působení síly v aktuátoru, napište rovnici pro elst. energii aktuátoru, napište rovnici pro odvození působící síly na pohyblivou elektrodu, obrázek označte veličinami korelujícími s rovnicemi.

Princip - Dielektrikum lze nahradit vodivým materiélem, vodivý rotor je v Si mikroaktuátořech obvykle ze silně dotovaného poly-Si

Tloušťka rotoru musí být menší, než je vzdálenost elektrod kondenzátoru ($d > d'$)

Model se 3 kondenzátory a energií W_c

Síla pohyblivého rotoru ve směru y

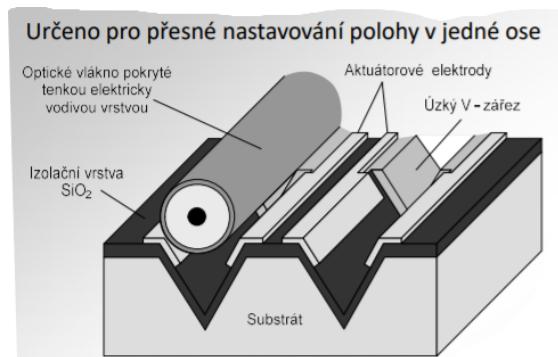
$$F_y = \frac{dW_c}{dy} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{zd'}{d(d-d')} U^2$$

69. Nakreslete příklad aplikace elst. aktuátoru pro mikropinzety

Princip činnosti

Hřebenové uspořádání (comb drive) - větší počet kondenzátorů. Délka typického mikrouchytu je 400 μm s typickou vzdáleností úchytu 10 μm. Lze aplikovat např. pro mikromanipulátory nebo pro roboty při výrobních procesech nebo např. v mikrochirurgii.

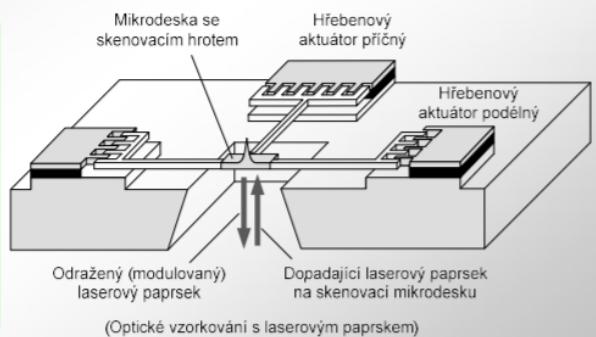
70. Nakreslete příklady aplikace alst. Aktuátoru pro nastavování pozice opt. Vlákna



71. Nakreslete příklad aplikace. elst. aktuátorů pro nastavování souřadnic x, y u AFM

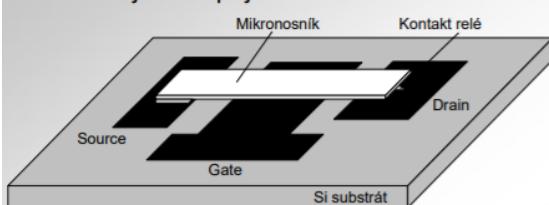
Princip: Řízení polohy skenovacího hrotu u AFM skenovacího mikroskopu. Polohovací systém je složený ze dvou aktuátorů ovládajících polohu skenovacího hrotu. Elektrostatické řízení je vytvořeno v hřebenovém kondenzátorovém systému. Celý mechanismus je realizovaný na polovodičovém substrátu. Otvor v substrátu slouží pro optické měření pohybu systému ve směru osy z. K měření se používá interferometrická metoda s laserovým paprskem. Tato metoda umožňuje měření se subnanometrickým rozlišením.

Poznámka - Rozměry
mikrodestičky se skenovacím hrotem jsou $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, nosníky mikrodestičky mají délku $270 \mu\text{m}$, šířku $0,6 \mu\text{m}$ a výšku $2 \mu\text{m}$. Hrot je vysoký $8 \mu\text{m}$. Při napětí 40 V na aktuátor se dosáhne vychýlení mikrodestičky v příslušném směru o $5 \mu\text{m}$.

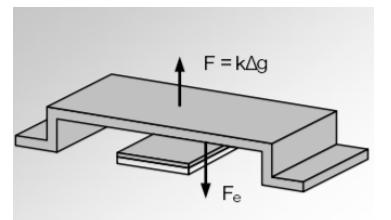


72. Nakreslete příklady uspořádání elektrod MEMS elst. Přepínače

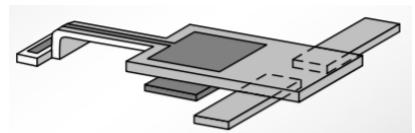
Princip činnosti: napětí mezi source a gate přitáhne veknutý nosník k elektrodě drain – dojde ke spojení kontaktů mezi elektrodami source a drain



? Nakreslete příklady uspořádání elektrod MEMS elst. přepínače

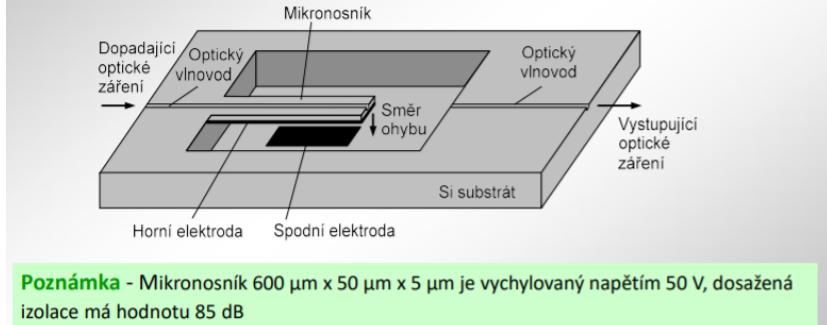


Vlastnosti: odstraňuje některé nevýhody polovodičových relé, např. odpór při sepnutém a vypnutém stavu, náchylnost na vibrace, vlastní spotřeba, apod. Rozměry těchto relé jsou typicky $100 \mu\text{m}$, vynikající imunita k vibracím, vlastní spotřeba typicky μW , poměr odporu mezi rozepnutým a sepnutým stavem je typicky lepší než 10^{10} , jsou velmi levná.



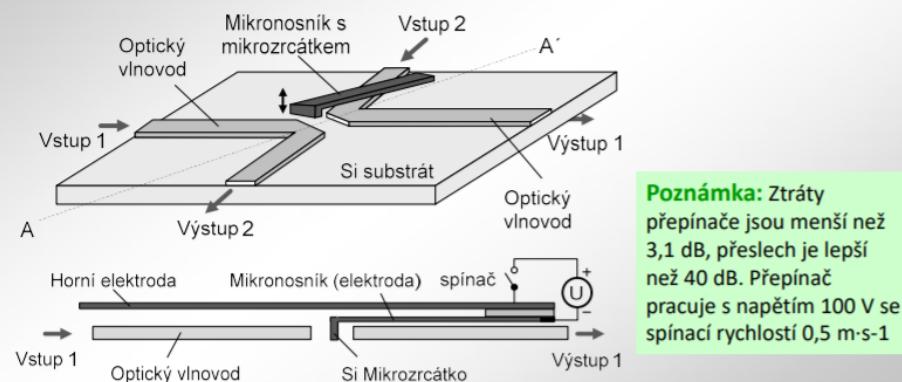
73. Nakreslete princip činnosti MEMS elst. vypínače signálu s integrovaným optickým vlnovodem

- Optický vlnovod je umístěný na veknutém nosníku, který lze elst vychylovat nahoru a dolů, vlnovod je přerušený vzduchovou mezou
- Pokud je nosník v základní poloze, optická cesta není přerušena
- Vychýlením nosníku se přeruší optická cesta ze vstupu na výstup

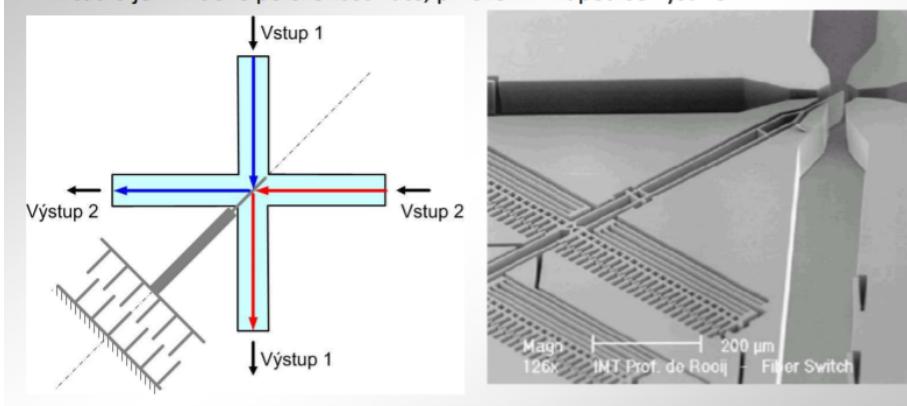


74. Nakreslete princip MEMS elst. přepínače 2x2 optického signálu s vertikálním pohybem odrazového zrcátka

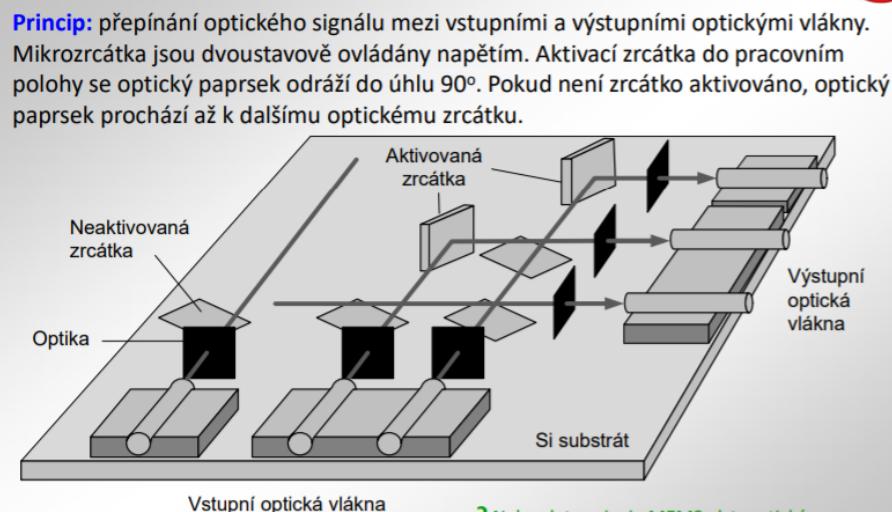
- přepínání optické cesty mezi dvěma nezávislými vstupními a výstupními optickými signály
- přepnutí optického signálu do druhého výstupního kanálu se realizuje vychýlením zrcátka umístěného na konci nosníku směrem dolů



- Optické zrcátko je ovládáno hřebenovým elst aktuátorem
- Optické zrcátko je realizováno jako pokovená Si planžeta
- Zrcátko je v klidové poloze zasunuté, přiložením napětí se vysune.

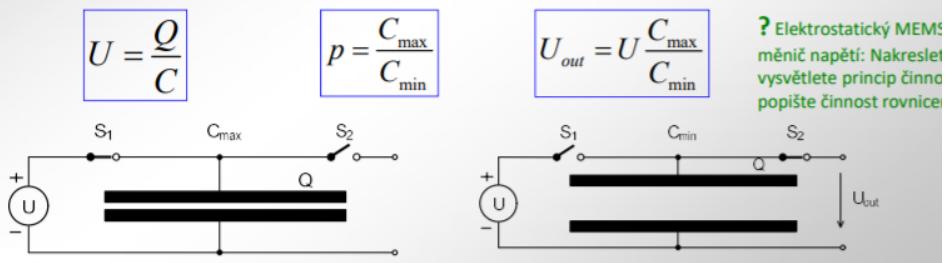


75. Nakreslete princip MEMS elst. optické přepínací matice s odrazovými mikrozrcátky pro různý počet optických vstupů a výstupů optického signálu



76. Elektrostatický MEMS měnič napětí: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, popište činnost rovnicemi

- MEMS napěťový konvertor - MEMS struktury elektromechanických napěťových měničů (step-up).
- Princip je založený na kondenzátoru s proměnnou vzdáleností desek ve spojení s elektrostatickým aktuátorem.
- Lze využít pro zdroje autonomního napájení v MST s piezoelektrickým nebo elektrostatickým principem.
- U kondenzátoru lze zvýšit nebo snížit p-krát zmenšením nebo zvětšením C p-krát při zachování Q
- Změna je řízena mechanickým elst. mikroaktuátorem
- Periodické přepínáním mezi dvěma C - bistabilní napěťový konvertor.



Činnost MEMS měniče napětí je rozložena do čtyřech kroků:

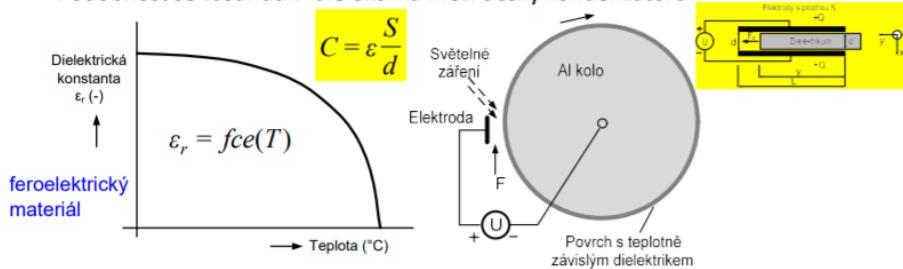
- **Krok 1:** Spínač S₁ je sepnutý, desky kondenzátoru jsou u sebe a mají kapacitu C_{max}, napětí na kondenzátoru je U.
- **Krok 2:** jsou spínače S₁ a S₂ rozepnuty, oddálením desek kondenzátoru se změní kapacita na C_{min} (náboj kondenzátoru Q se nezmění) a dojde ke změně napětí na kondenzátoru U_c na maximální hodnotu.
- **Krok 3:** sepně spínač S₂, kondenzátor se připojí k zátěži s napětím U_{cmax}=U_{out}.
- **Krok 4:** se spínače S₁ a S₂ rozepnou, desky kondenzátoru se přiblíží a kapacita kondenzátoru se změní na C_{max}.

ELEKTROSTATICKÝ PRINCIP – MIKROAKČNÍ ČLENY

77. Rotační elektrostatický mikromotor, tzv. Curie kolo: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Princip:

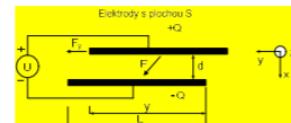
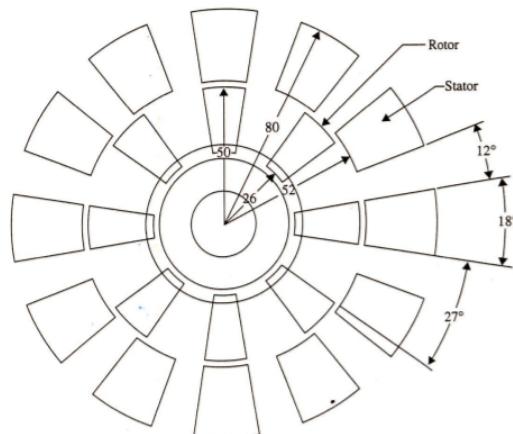
- Feroelektrický materiál, např. BaTiO₃ s ϵ_r , závislou na teplotě (změna kapacity)
- Kondenzátor mezi ploškou na kole (změna ϵ_r) a pevnou elektrodou kondenzátoru
- Vodivé kolo pokryté BaTiO₃, lokální ohřev světlem, snížení ϵ_r
- Elektrostatická síla kondenzátoru přitáhne část s vyšší ϵ_r , tj. pootočí s kolem
- Podobnost se zasunutím dielektrika mezi desky kondenzátoru



78. Rotační elektrostatický mikromotor s proměnou kapacitou (VCM): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

VCM - variable capacitance micromotors

(Synchronní elektrostatický mikromotor)



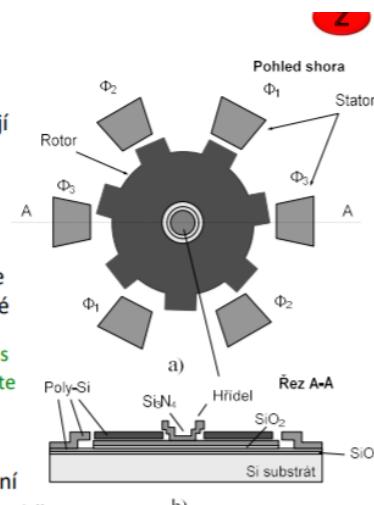
Princip:

- Rotor s póly tvořícími proměnné kapacity mezi póly statoru
- Rotor uzemněný, postupně na elektrodách statoru rotují napěťové impulsy řídícího signálu
- Příčné působení elektrostatických sil mezi pólovými nástavci
- Snížení přitažlivých sil mezi rotem a statorem (substrát) - na spodní části rotoru vodivá vrstva z vysoko dotovaného poly-Si (stíní elektrostatické síly generované nabíjením substrátu)

? Rotační elektrostatický mikromotor s proměnou kapacitou (VCM): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

¶ Nevýhody:

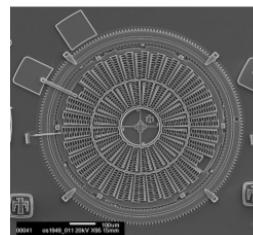
- Nevyrovnaná síla způsobuje nestabilitu rotoru
- Přitažlivá síla mezi rotem a statorem zvyšuje opotřebení
- Podmínka vyčnívání pólů statoru způsobuje potíže při výrobě



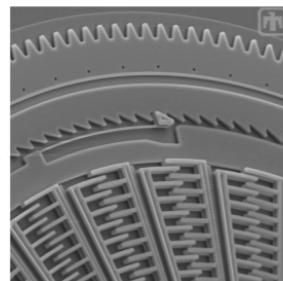
79. Elektrostatický oscilační rohatkový mikromotor: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Princip:

- Kruhové uspořádání hřebenových struktur pohonného elektrostatického mechanismu.
- Napětí přitahuje elektrody, rotorové elektrody pootočí rotorem.
- Po odpojení napětí se vrátí rotorové elektrody zpět do původní polohy.
- K rotorovým elektrodám je připojena rohatka, při napětí pootočí rotor. Rohatka zabrání vracení zpět při odpojení napětí.
- Realizace na Si substrátu.

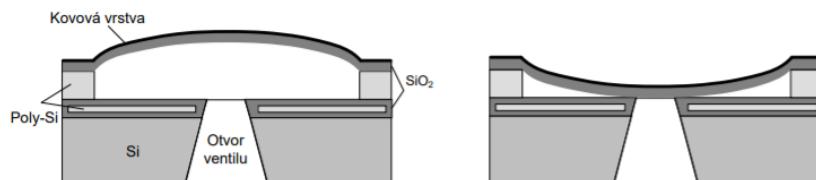


? Elektrostatický oscilační rohatkový mikromotor:
Nakreslete a vysvětlete princip činnosti



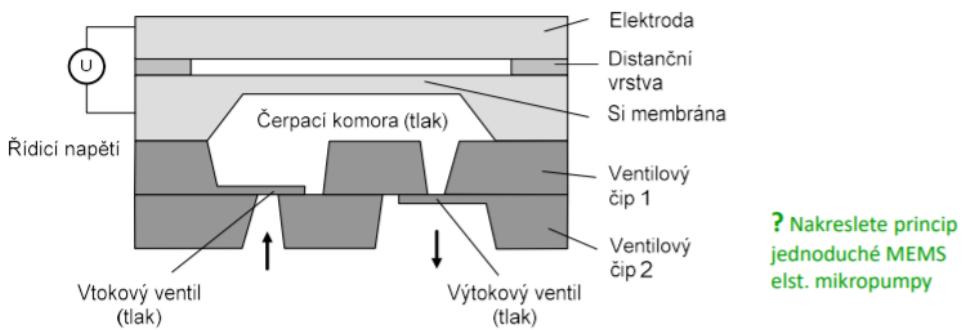
80. Nakreslete princip jednoduchého MEMS elst. membránového ventilu

Princip: - mikroventil s elasticou membránou SiO_2 ve tvaru proužku. Základ je Si substrát s vyleptaným ventilovým otvorem a SiO_2 membránou na horní části. Vnitřním napětím struktury je membrána vyklenuta nahoru, ventil je otevřený. SiO_2 membrána s povrchem Cr působí jako pohyblivá elektroda. Při napětí mezi poly-Si elektrodami se membrána prohne dolů a uzavře ventilový otvor. Ventil odolný vůči elmg poli, mechanickým nárazům, pohyblivá část ventilu má velmi malou hmotnost.



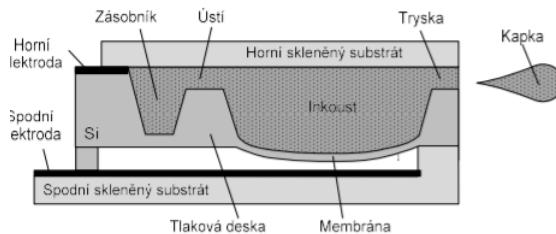
81. Nakreslete princip jednoduché MEMS elst. Mikropumpy

Princip: Mikropumpa je ze čtyřech Si čipů. Dva horní čipy vytvářejí řídicí část (membrána a elektrody). Ve spodním čipu jsou vstupní a výstupní ventily. Při napětí mezi membránou a elektrodou se membrána vynese k elektrodě (v komoře pod membránou se vytvoří podtlak, otevře vtokový ventil, tekutina je vtažena do komory pod membránou). Po vypnutí napětí se membrána vrátí do původní polohy a stlačí tekutinu do výtokového ventilu.



82. Generátor kapek pro ink-jet tiskárny s elektrostatickým řízením: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

- Po připojení napětí na spodní elektrodu a vrchní elektrodu spojenou s tlakovou membránou dojde k přitažení membrány ke spodní elektrodě a tím i vytvoření podtlaku nad membránou.
- Podtlakem se naplní komora inkoustem.
- Po odpojení napětí se membrána vrátí do původní polohy a tím vytlačí určité množství inkoustu do trysky, za tryskou se vytvoří kapka inkoustu.
- Elektrostaticky řízené ink-jet tiskové hlavy se poprvé objevily v roce 1998 a v roce 2000 se začaly realizovat pro účely komerčního tisku.



? Generátor kapek pro ink-jet tiskárny s elektrostatickým řízením: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Parametry:

Výkonová spotřeba generátoru s jednou tryskou je 0,525 mW, řídící napětí má hodnotu 26 V a může mít frekvenci až 18 kHz. S uvedeným principem lze vytvořit čip s 128 tryskami pro tisk s 360 dpi rozlišením. Struktura má vysokou životnost (více než 4 miliardy kapek z jedné trysky)

83. Elektro-hydrodynamický aktuátor (např. pumpa): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, která síla se uplatňuje nejvýznamněji?

Princip:

- Vzájemného působení nehomogenního elektrického pole a ionizované nebo polarizovatelné kapaliny nebo plynu.
- Silového působení je založeno na principu změny dielektrika kondenzátoru.
- F působící v kapalném dielektriku za přítomnosti nehomogenního elektrického pole

$$F = qE + PVE - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \nabla \left(\frac{1}{2} \rho \frac{\delta \epsilon}{\delta p} E^2 \right)$$

Coulombovská síla Kelvinova polarizační síla Korteweg-Helmholzova síla Elektrostrikční síla (pouze pro stlačující prostředí)

ϵ je permitivita tekutiny, P je polarizační vektor, ρ je měrná hustota, q je hustota volného prostorového náboje a E je intenzita elektrického pole v tekutině.

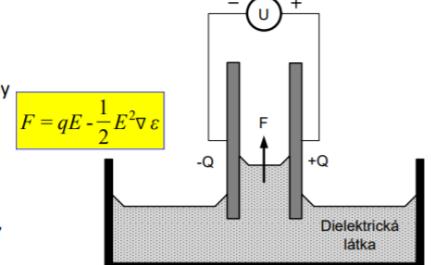
Polarizační síla je nulová ve stejnosměrném poli a je mnohem menší než Coulombovská síla v nehomogenním proměnném poli (měnícím se).

První a třetí člen ve vzorce jsou významné a mají nejdůležitější příspěvek do silového pole.

Elektro-hydrodynamické aktuátory (pumpy) proto potřebují ke své činnosti buď tekutou látku s indukovaným gradientem permitivity nebo tekutinu obsahující volné (indukované) náboje.

Teplotní gradient může být použit k indukování gradientu permitivity.

Náboje mohou být injektovány do kapaliny elektrodami nebo mohou být kapacitně indukovány v kapalině pomocí izolovaných elektrod nebo elektrodami s velkou povrchovou nabíjecí bariérou.



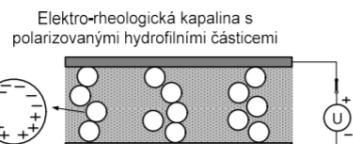
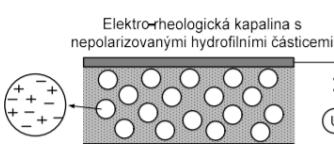
Výše uvedený vztah ukazuje sílu, která působí v tekutém dielektriku

84. Elektro-rheologický aktuátor: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, nakreslete alespoň jeden příklad aplikace (např. převodovka, ventil)

Princip:

- Kondenzátor s elektrodami mezi kterými protéká tekutina s dielektrickými a polovodičovými částicemi s rozmezí 0,04 μm až 50 μm.
- Při U se pevné částice polarizují a uspořádají se v řetězce mezi kladnou a zápornou elektrodou, tj. vytvázejí „můstky“ napříč tekutinou mezi elektrodami.
- Vytvořené můstky zvyšují tření mezi elektrodami a tekutinou (zvyšuje se dynamická viskozita).
- Proces je reversibilní, po odpojení U se můstky rozpadnou.
- Typická $E = 2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$, při $E = 4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ se třecí vlastnosti tekutiny blíží pevným látkám.
- Třecí síly jsou porovnatelné s hydraulickými silami.
- Maximální E je určena dielektrickým průrazem tekutiny.

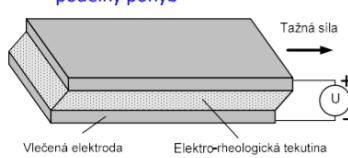
? Elektro-rheologický aktuátor:
Nakreslete a vysvětlete princip činnosti,
nakreslete alespoň jeden příklad aplikace
(např. převodovka, ventil)



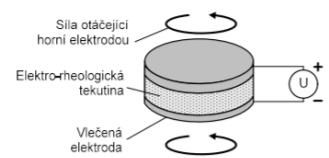
Aplikace:

- Mikrotekutinové hydraulické systémy
- Konstrukce řízených ventilů
- Aktuátor s přenosem síly z jedné elektrody na druhou přes elektro-rheologickou tekutinu

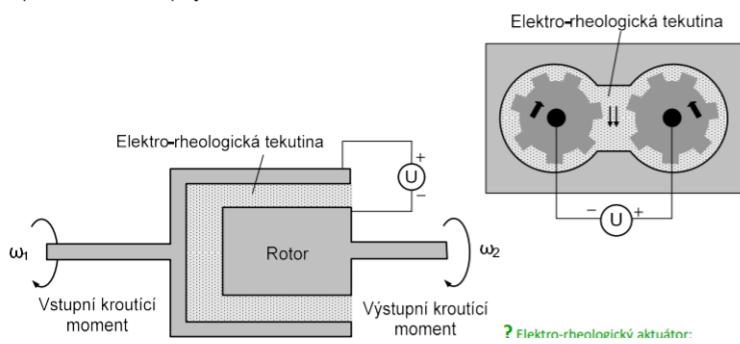
podélný pohyb



kruhový pohyb

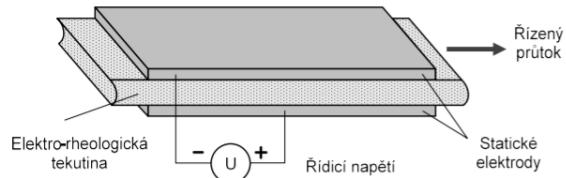


Uvedený princip je využitelný např. pro **hydraulické spojky** nebo **mikropřevodovky**, které využívají třetích sil tekutiny a přes tekutinu se přenáší silové působení (kroutící moment) z jednoho kola na druhé



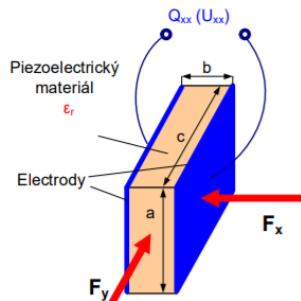
Ventilový efekt

Pokud obě elektrody budou pevné a mezi nimi bude procházet tekutina, po přiložení elektrického napětí se změní viskozita a průtok tekutiny mezi elektrodami se „zabrzdí“. Jedná se o tzv. ventilový efekt. Pro konstrukci aktuátorů s elektro-rheologickým principem lze využít i kombinaci obou jevů, tj. převodového a ventilového.



PIEZOELEKTRICKÉ MIKROAKČNÍ ČLENY

85. Piezoelektrický jev pro mikroakční členy: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti podélného a příčného piezoelektrického jevu, Napište nebo odvoďte základní rovnice popisující podélný a příčný jev



Podélný piezoelektrický jev (F_x)

$$Q_{xx} = k_p F_x \quad Q_{xx} = C U_x$$

$$U_{xx} = k_u F_x \quad k_u = \frac{k_p}{C}$$

Příčný piezoelektrický jev (F_y)

$$Q_{xx} = k_p \frac{b}{a} F_y$$

$$U_{xx} = k_u \frac{b}{a} F_y$$

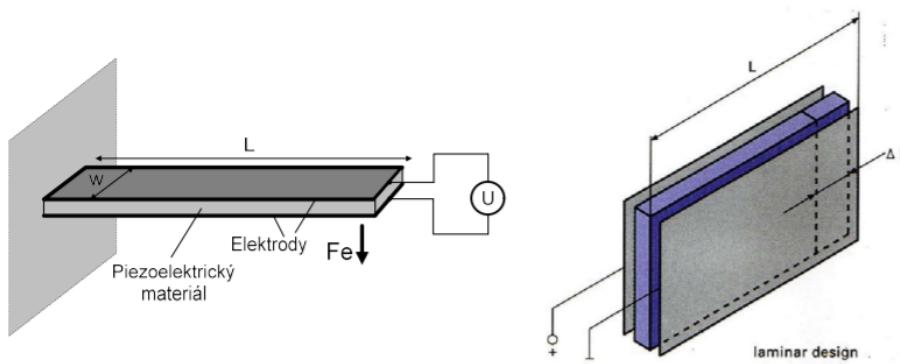
? Piezoelektrický jev pro mikroakční členy:
Nakreslete a vysvětlete princip činnosti podélného a příčného piezoelektrického jevu, Napište nebo odvoďte základní rovnice popisující podélný a příčný jev

k_p – piezoelektrická konstanta
 k_u – napěťová citlivost senzoru

Na elektrodách se vytváří náboj (napětí)

86. Piezoelektrický veknutý ohybový nosník: Nakreslete princip činnosti nosníku

Motorický koeficient d - udává změnu rozměru / působící napětí

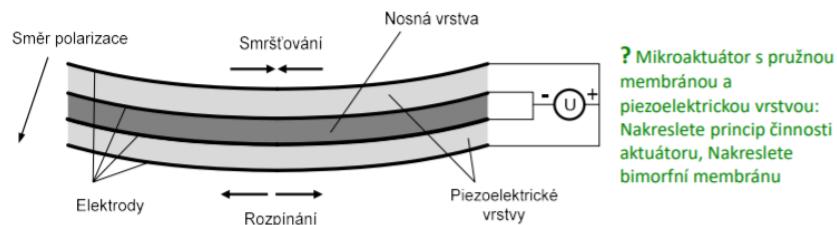


87. Mikroaktuátor s pružnou membránou a piezoelektrickou vrstvou: Nakreslete princip činnosti aktuátoru

Bimorfní piezoelektrická struktura - složením dvou piezoelektrických vrstev, piezoelektrické desky jsou umístěny po stranách nosné desky, jsou po obou stranách pokryty elektricky vodivou vrstvou.

Princip činnosti

- Koordinované rozpínání/stahování piezoelektrických vrstev.
- Keramický materiál se rozpíná ve směru kolmém k osám jeho polarizace.
- Elektrické pole působí ve směru nebo proti směru polarizace piezoelektrických vrstev.
- *Rozplňání vrstvy* - směr polarizace a elektrického pole jsou shodné.
- *Smršťování vrstvy* - opačný směr polarizace a elektrického pole.

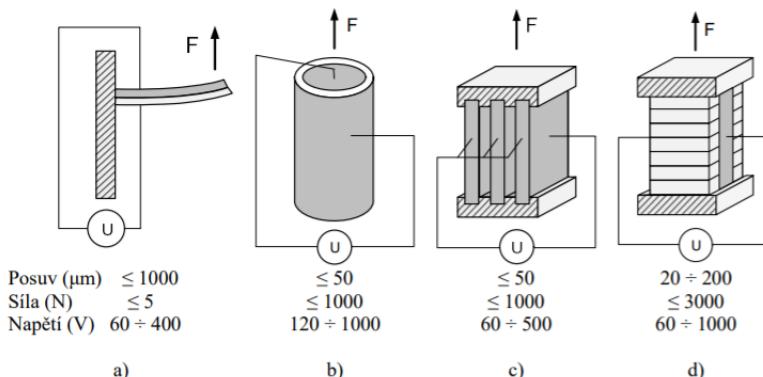


? Mikroaktuátor s pružnou membránou a piezoelektrickou vrstvou:
Nakreslete princip činnosti aktuátoru, Nakreslete bimorfní membránu

88. Základní struktury mikroaktuátorů: Nakreslete základní struktury a uspořádání piezoelektrických aktuátorů

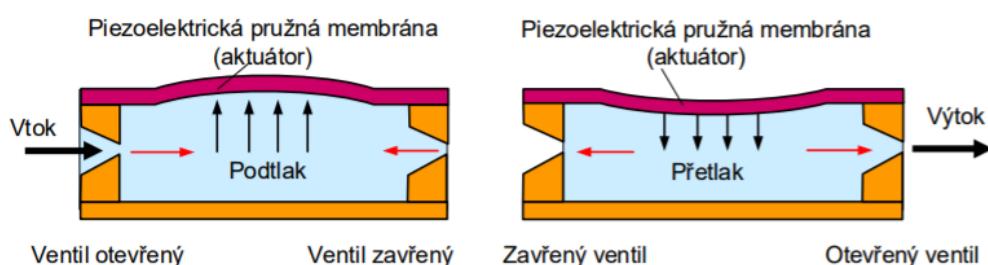
Silové působení

keramické vrstvy o tloušťce od 10 µm, napětí od 100 V.



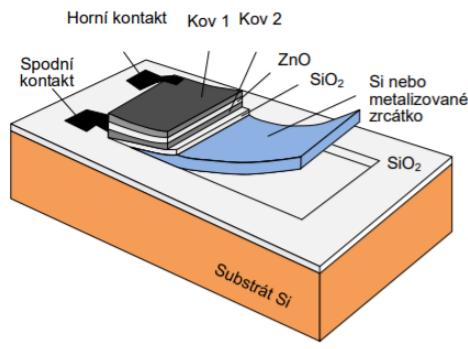
89. Bezventilová piezoelektricky řízená mikropumpa: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Vstupní a výstupní otvory jsou navržené tak, aby pro průtokové objemy a geometrické rozměry vykonávaly pasivně správné funkce, tj. vstupní otvor propouštěl kapalinu dovnitř při vytvoření vnitřního podtlaku a zároveň výstupní otvor nebyl schopen vypouštět kapalinu. Při vytvořeném vnitřním přetlaku je funkce obrácená.



90. Piezoelektricky řízený skener čárového kódu: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Aktuátor - identifikace čárových kódů, v optických komunikacích, laserových systémech



91. Piezoelektricky řízený generátor inkoustových kapek pro ink-jet: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

Generátor s řízenou injekcí kapek

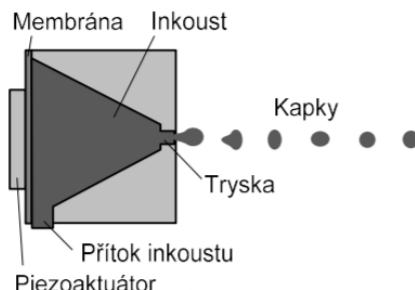
Kapky jsou generovány s řízenou injekcí

vytvořená akustická vlna prochází inkoustovým zásobníkem

Výhoda - nevyžaduje vychylovací systém pro kapky. Každá tryska musí být ovládána jedním piezoelektrickým aktuátorem (rozměry od sub milimetrů do několika milimetrů)

⚠ Nevýhoda

- vzhledem k velkým rozměrům nelze vytvořit matici trysek umístěných blízko sebe pro vytvoření tisku s vysokým rozlišením
- Typická pracovní frekvence standardního tiskového režimu piezoelektrického ink-jetu může být až **desítky kHz**



92. Akusticky řízený generátor inkoustových kapek pro ink-jet: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti

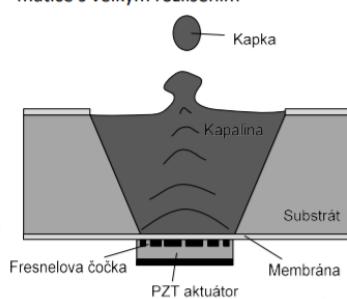
Akusticky řízený generátor kapek

Vytvoření kapek - interference mezi kapalinou a akustickou vlnou

aktuátor s pomocí jednočipové Fresnelovy čočky vytváří směrovanou akustickou vlnu, která vytváří na rozhraní kapaliny se vzduchem kapky.

Výhoda: Nepotřebuje trysku. Velikost kapek lze řídit parametry akustické vlny.

⚠ Nevýhoda: Velký rozměr generátoru jedné kapky cca 1 mm^2 neumožňuje realizovat matici s velkým rozlišením



Parametry

Rozsah budící frekvence RF signálu piezoelektrického aktuátoru je 100 MHz až 400 MHz. Spotřeba je v porovnání s ostatními systémy vysoká, pro vytvoření jedné kapky je potřebná energie o velikosti 1 mJ. Kapky mají v závislosti na RF frekvenci velikost 20 μm až 100 μm.

TEPELNÉ MIKROAKČNÍ ČLENY

93. Celkový tepelný příkon mikroaktuátoru: Napište rovnici a vysvětlete význam jejich členů



Celkový tepelný příkon mikroaktuátoru:

$$P_{in} = P_F + P_t + P_a$$

P_{in} - tepelný příkon dodaný do struktury ze zdroje tepla

P_F - tepelný výkon přeměněný v mechanickou práci (akční síla)

P_t - ztrátový tepelný výkon, který zůstává ve struktuře (způsobuje zvyšování teploty s časem)

P_a - tepelný výkon přenesený do okolí

94. Mechanismy přenosu tepla do okolí: Napište rovnici a vysvětlete význam jejich členů

$$P_{in} = P_F + P_t + P_a$$

P_a - ze tří členů souvisejících s různými mechanismy přenosu tepla do okolí

$$P_a = P_v + P_p + P_z$$

P_v - výkon přenesený tepelným vedením (tepelná difúze)

P_p - výkon přenesený tepelným prouděním

P_z - výkon přenesený tepelným vyzařováním.

95. Přenos tepla vedením (tepelná difúze): Popište princip, napište základní jednorozměrnou rovnici

Jednorozměrný přenos tepla v pevné látce lze popsat vztahem

? Přenos tepla vedením

(tepelná difúze): Popište princip, napište základní jednorozměrnou rovnici

$$P_v = -kS \frac{dT}{dx}$$

T - teplota

k - koeficient tepelné vodivosti

S - plocha

Poznámka:

- Rozložení teploty T(x) je nutné řešit rovnici vedení tepla pro homogenní materiály
- Mikroaktuátory jsou 3D struktury složené často z několika vrstev s různými materiály a různými teplotními vlastnostmi
- Vytvoření tepelného modelu je značně komplikovanější – řešení je často numerické

96. Přenos tepla prouděním: Popište princip, napište základní jednorozměrnou rovnici

driftový proces - okolní plyn nebo kapalina se pohybuje a přenáší tak tepelnou energii

2 typy proudění (přirozené a vynucené):

přirozené proudění - nosiče tepelné energie okolní látky pohybují v důsledku teplotního gradientu při povrchu aktuátoru

vynucené proudění - pohyb je podporován externě, tj. pohyb kapaliny nebo plynu je způsoben energií v vnějšího prostředí

Jednorozměrný přenos tepla prouděním lze popsat vztahem

$$P_p = h_p S \Delta T$$

P_p - tepelný přenos prouděním

S - plocha kolmá ke směru proudění

ΔT - rozdíl teplot mezi povrchem a kapalinou

h_p - koeficient závislý na vlastnostech povrchu materiálu, geometrickém tvaru, na vlastnostech kapaliny a na rozdílu teplot ΔT .

? Přenos tepla prouděním:

Popište princip, napište základní jednorozměrnou rovnici

97. Přenos tepla zářením: Popište princip, napište základní rovnici pro těleso s absolutně černým povrchem, napište rovnici pro těleso s obecným povrchem

- Způsobeno IR záření, které je vyzařováno z ohřátého tělesa do okolí
- Celková tepelná energie vyzářená **černým tělesem** podle Stefan-Boltzmanovy rovnice

$$P_b = \sigma T^4$$

T - teplota černého tělesa
σ - Stefan-Boltzmanova konstanta $5,676 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

- **Tepelná energie vyzářená libovolným tělesem**

? Přenos tepla zářením:

Popište princip, napište základní rovnici pro těleso s absolutně černým povrchem, napište rovnici pro těleso s obecným povrchem

$$P_z = \varepsilon P_b$$

ε - zářivost tělesa (*ε < 1*)

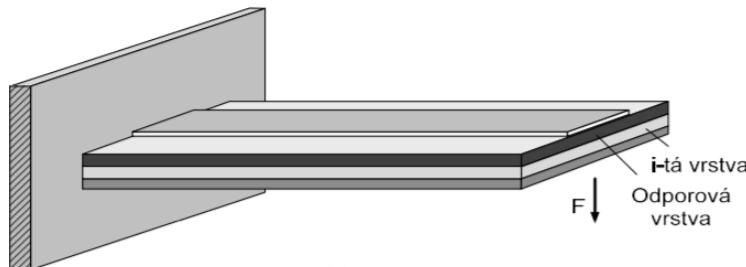
P_z - energie vyzářená daným tělesem

P_b - energie vyzářená černým tělesem

98. Vícevrstvová nosníková struktura: Nakreslete a popište princip činnosti

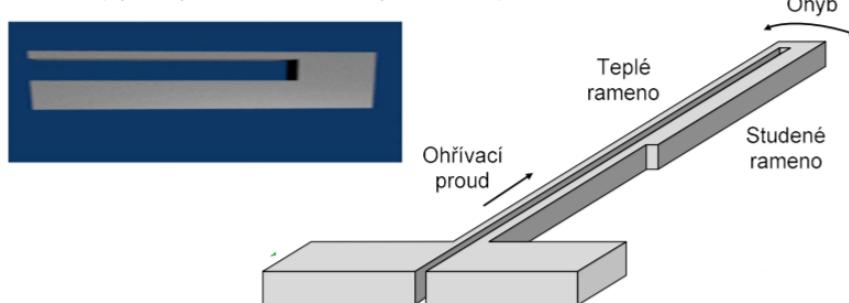
- Vrstvené materiály s různými koeficienty teplotní roztažnosti
- Geometrické rozměry se mohou lišit
- Odpornová vrstva - průchodem proudu ohřívá aktuátor

⚠ Nevýhoda: Relativně velký příkon



99. Homogenní nosníková struktura s různým průřezem: Nakreslete a popište princip činnosti

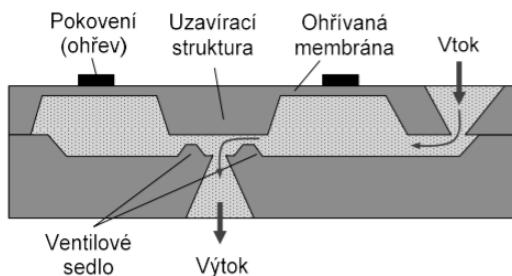
- Spojení ohybového a ohřívacího elementu do jednoho dílu
- Nosník je vytvořený smyčkou, kterou prochází elektrický proud
- Rozdílný průřez materiálu v různých částech smyčky
- Části s menším průřezem mají větší elektrický odpor způsobující větší ohřev této části (vyšší teplota, větší relativní prodloužení)



100. Tepelně řízený mikroventil: Nakreslete a popište princip činnosti

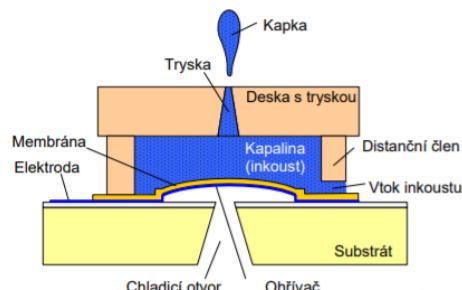
Tepelně řízený mikroventil pro plyny

- Pružná membrána a pevná základna s ventilovým otvorem
- Průhyb membrány po ohřevu uzavře ventilový otvor



101. Ink-jet hlava s tepelnou deformací membrány: Nakreslete a popište princip činnosti

- Přímo ohřívaná kruhová membrána z vrstev SiO_2 a Ni
- Ve středu ohřívací rezistor elektricky izolovaný od membrány
- Když vytvořené mechanické napětí v materiálu membrány je větší než kritické, membrána se prohne směrem nahoru a impulsně vytlačí malé množství inkoustu do trysky
- Rychlosť – řádově μs (proud má impulsní charakter, proto je průhyb membrány také impulsní s dobou několika μs)



102. Tepelné aktuátory s roztažností plynů: Nakreslete a popište princip silového aktuátoru

Mikroaktuátor s roztažností plynů

Čtvercová membrána $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, tloušťka $5 \mu\text{m}$, výška dutiny $100 \mu\text{m}$, objem dutiny $0,4 \text{ mm}^3$

Prohnutí membrány ohřevem plynu - elektrický proud, IR, převod jiné energie na tepelnou.

