

MEMS микрофони. Сензори за налягане

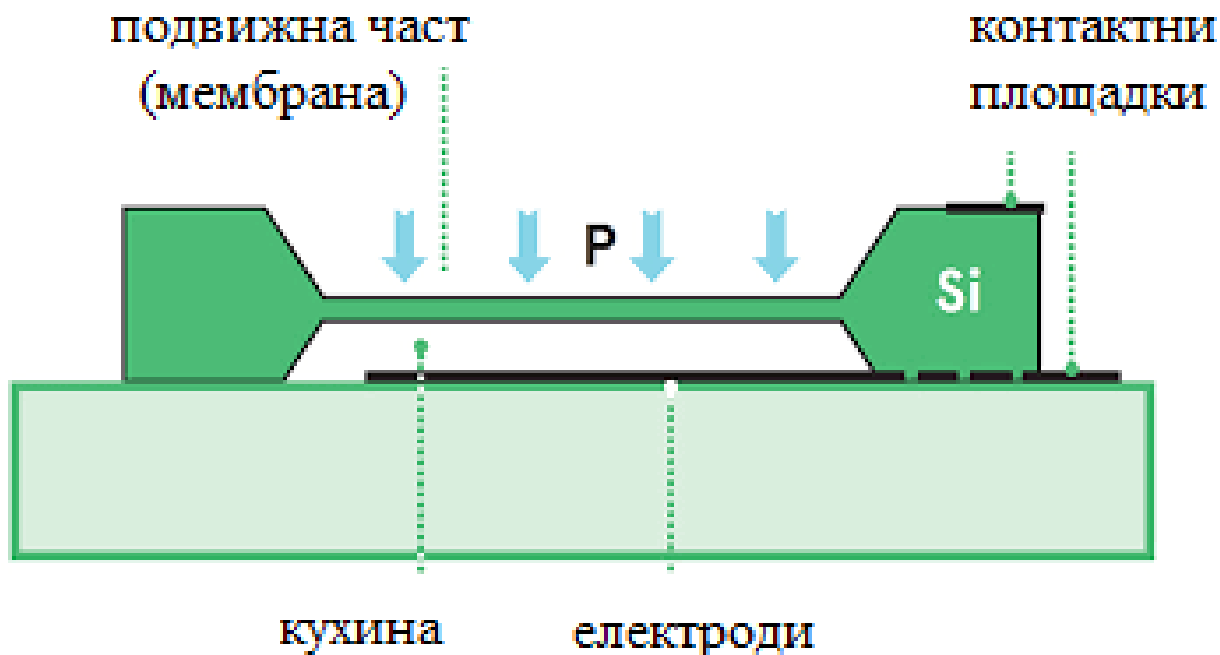
доц. д-р Мария Александрова

- Видове сензори за налягане според приложението
- Приложение на MEMS технологията за изграждане на микрофони
 - съображения при проектирането,
 - конструктивни решения,
 - използвани материали и технологични процеси
- Сравнение на видовете сензори за налягане (извън акустичния диапазон)

- Видове сензори за налягане според приложението:
 - измерване на динамично налягане,
 - метеорологично налягане,
 - кръвно налягане,
 - звуково налягане
 - ниско налягане (вакуумметри)
 - частен случай – акселерометри (измерват скорост на изменение на налягането)

Основните принципи на работа при MEMS сензорите за налягане, вкл. микрофони са:

- Капацитивен
 - (+) висока чувствителност и голямо съотношение сигнал/шум
 - (-) силна чувствителност към остатъчен механичен стрес
- Пиезоелектричен (резонансен и ПАВ сензор)
 - (+) ниска консумация и широк динамичен обхват;
 - (-) високо ниво на шум и слаба чувствителност
- Пиезорезистивен
 - (+) линейност;
 - (-) силна температурна чувствителност



За всички видове сензори на налягане, в частност микрофони **общият елемент е мембрана или диафрагма – подвижна част, реализираща микро- или нанопреместване**, което въздейства по определен начин върху параметрите на структурата или вложените материали.

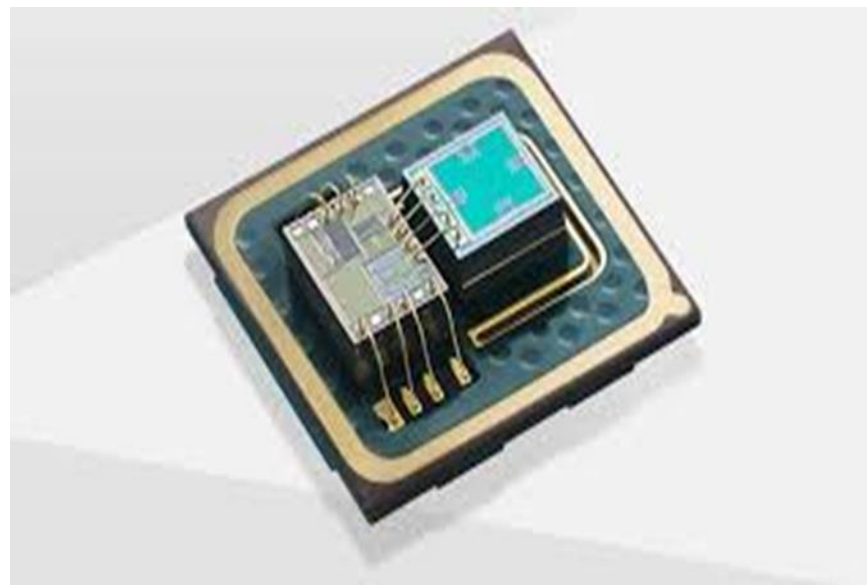
Хората могат да чуят **звук** в честотния диапазон от 20 Hz до 20 kHz.

Предимства на MEMS микрофоните спрямо техните макро аналози:

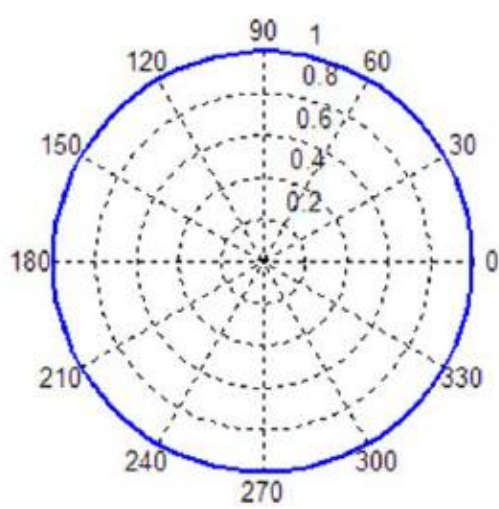
- по-висока производителност
- по-слаба зависимост на параметрите от температурата
- по-висока шумоустойчивост
- лесно се интегрират с други микроелектронни вериги
- удобни за използване под формата на масиви

Приложения на MEMS микрофоните:

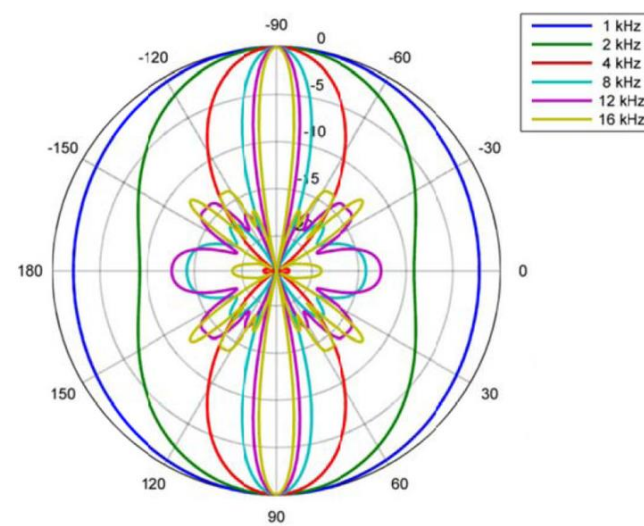
- смартфони и планшети,
- автомобилни уредби,
- медицински импланти (кохлеарни)



Изглед на чип с MEMS сензор на налягане и ASIC IC (Application - specific integrated circuit - интегрална схема със специализирано предназначение, персонализирана за конкретно приложение, а не за употреба от общ характер).

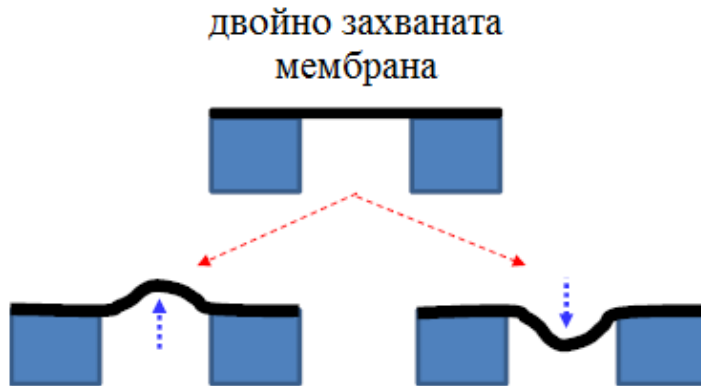


Диаграма на насоченост на многопосочен микрофон .

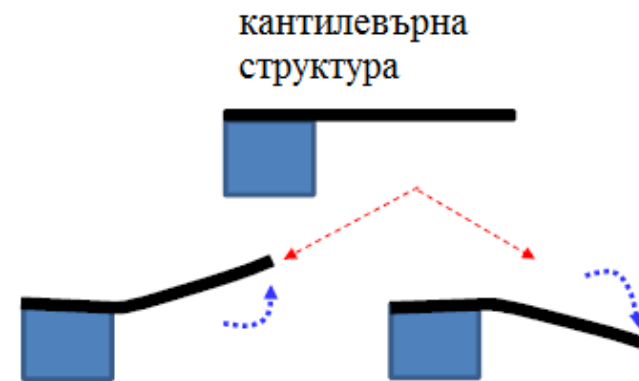


Диаграма на насоченост на двупосочен/насочен микрофон.

Конзолните мембрани (кантилевърни структури) не съдържат остатъчни механични напрежения в сравнение със захванатите в две точки.



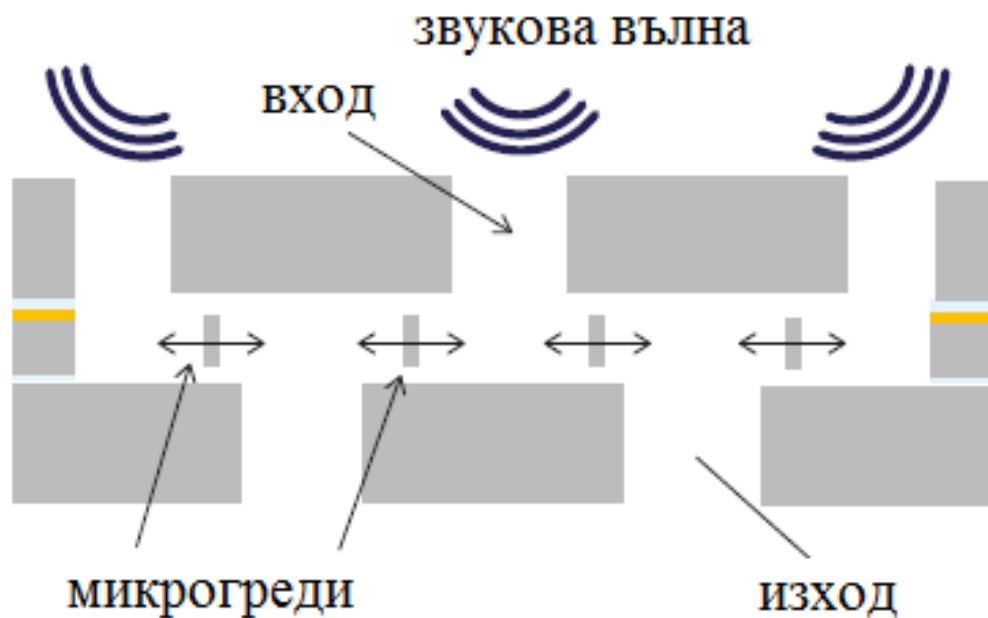
обемна микрообработка
(дълбоко анизотропно
ецване на силиций)



повърхностна микрообработка
(селективно ецване на жертвен слой)

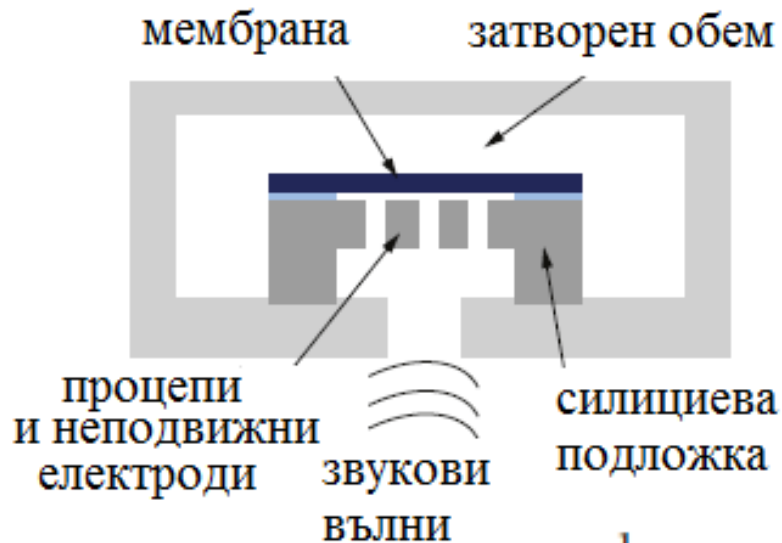
- Данни за комерсиални MEMS микрофони

КОМПАНИЯ	ПЛОЩ мембрана	дебелина мембрана	кухина	чувствителност	с/Ш
Analog Devices	NA	NA	3	-47 dBV/Pa	NA
Knowles	0.56 mm ²	1	4	-22 dBV/Pa	59 dB
Bosch	0.6 mm ²	NA	NA	NA	58 dB
Infineon	1.1 mm ² , 4 × 3 × 1 mm ³ ^У	330 nm, NA	2.2, NA	-78 dBV/Pa, -46 dBFS*	66 dB, 67 dB
STM	0.73 mm ²	NA	NA	-26 dBFS*, -38 dBV/Pa	61~65 dB



- Конструкция на пиезорезистивен MEMS микрофон.

- Най-популярната конструкция на кондензаторен MEMS микрофон.



W – преобразуваната енергия

C – капацитет на структурата

V – захранващо напрежение

F_e – електростатична сила

ϵ – диелектрична проницаемост на въздух
(или вакуум според конструкцията)

A – площ на мембраната

d – разстояние между електродите

x – отклонение на мембраната от статична позиция

S – електроакустична чувствителност

V_{bias} – индуциран потенциал

S_m – механична чувствителност,

a – радиус на мембраната

h – дебелина на мембраната

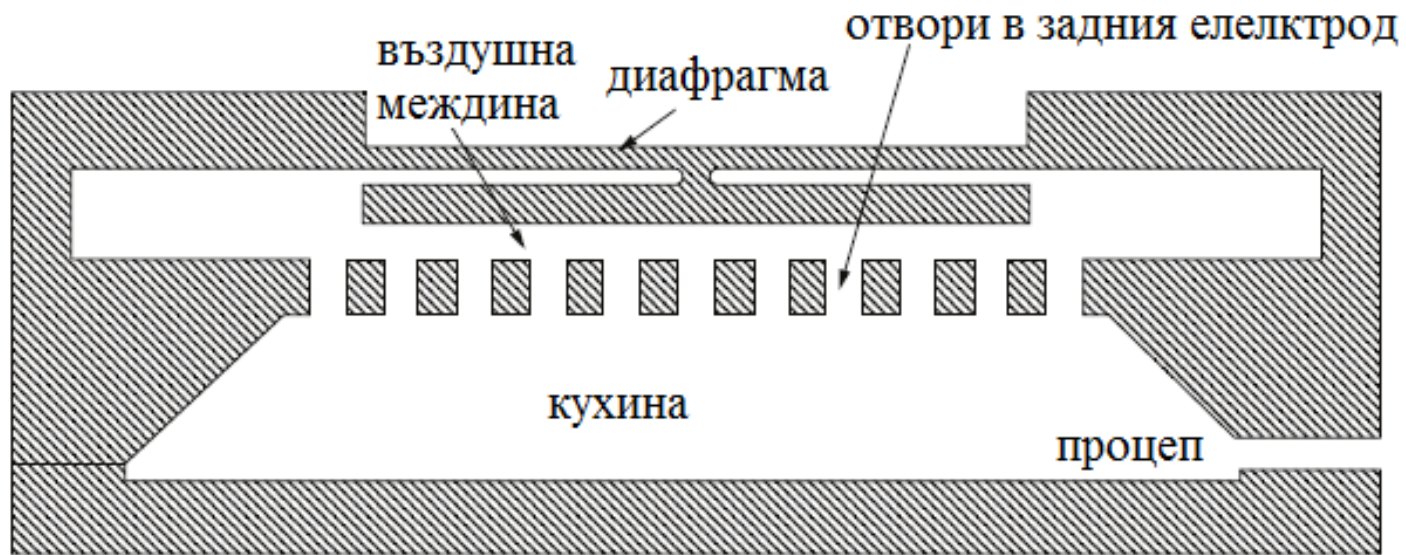
σ_0 – коравина на материала

$$C = \epsilon \frac{A}{d-x} \quad W = \frac{1}{2} CV^2$$

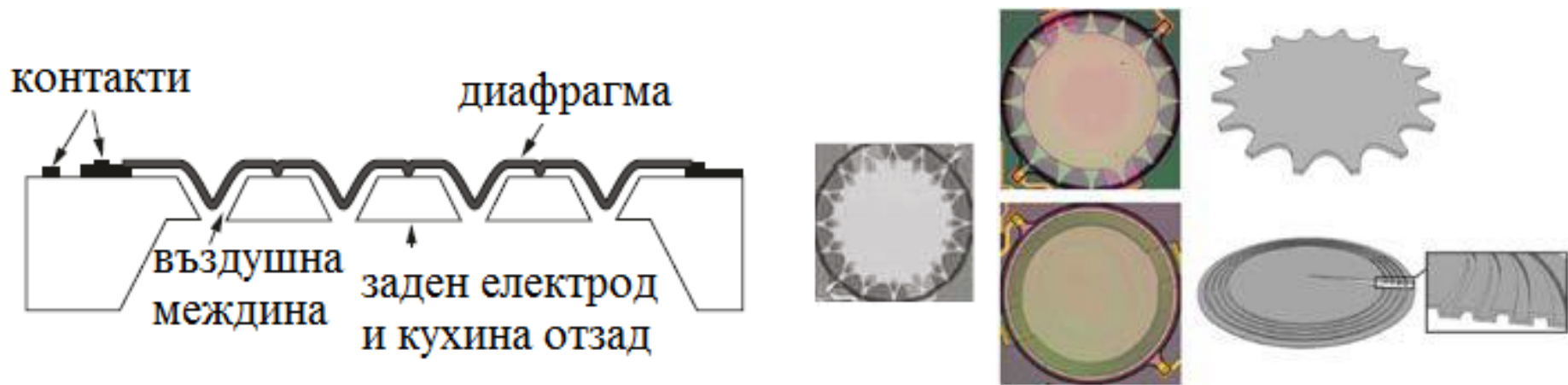
$$F_e = -\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2$$

$$S = \frac{V_{\text{bias}}}{d} X$$

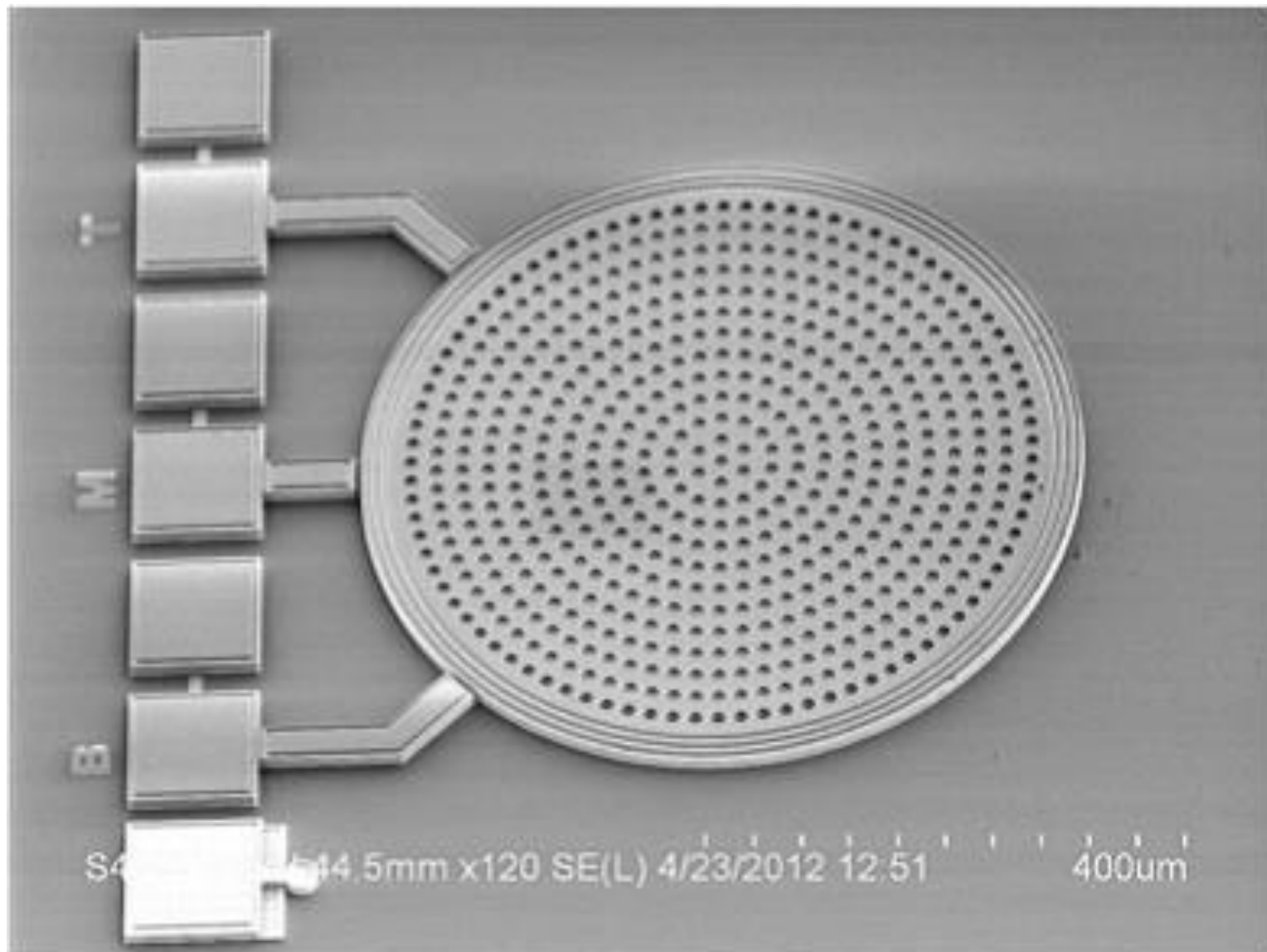
$$S_m = \frac{a^2}{8\sigma_0 h}$$



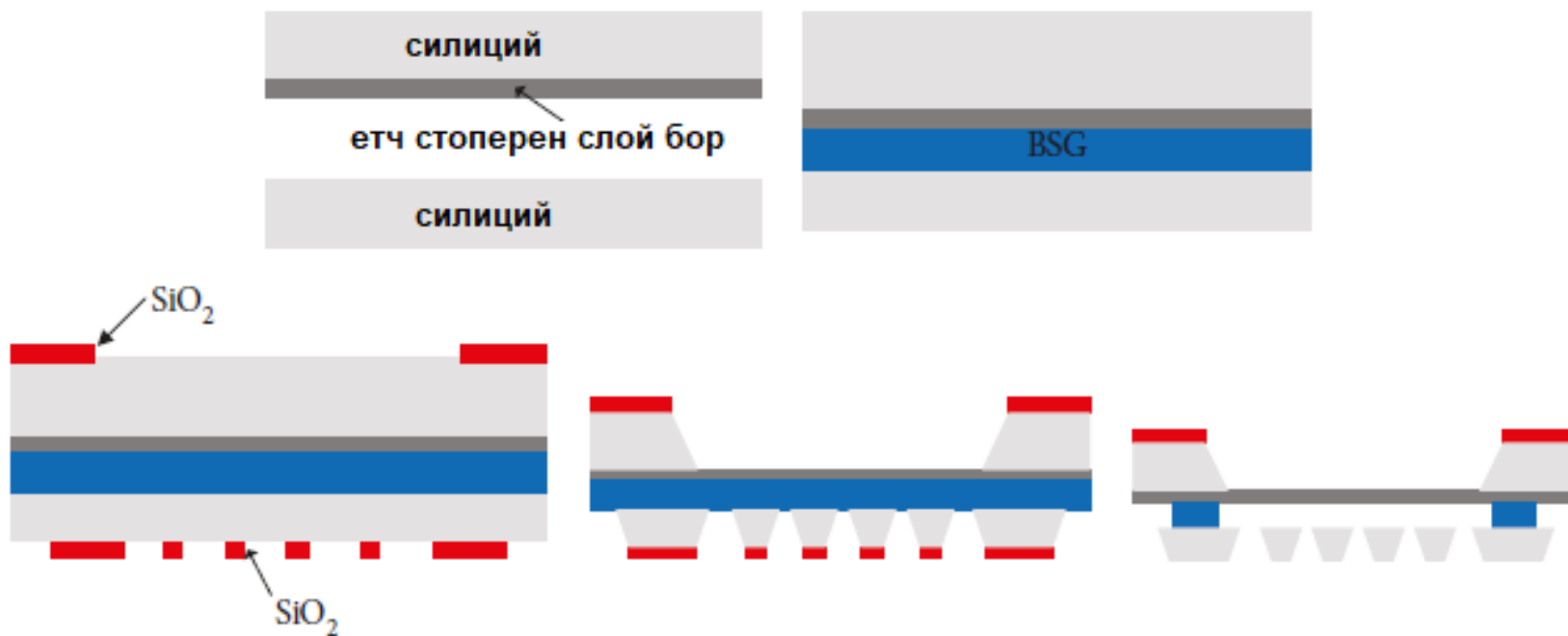
Структура с двойна мембрана (диафрагма) за подобряване на чувствителността



Структура с гофрирана мембрана (диафрагма) за подобряване на чувствителността



Микроскопска снимка на задния фиксиран електрод с отвори



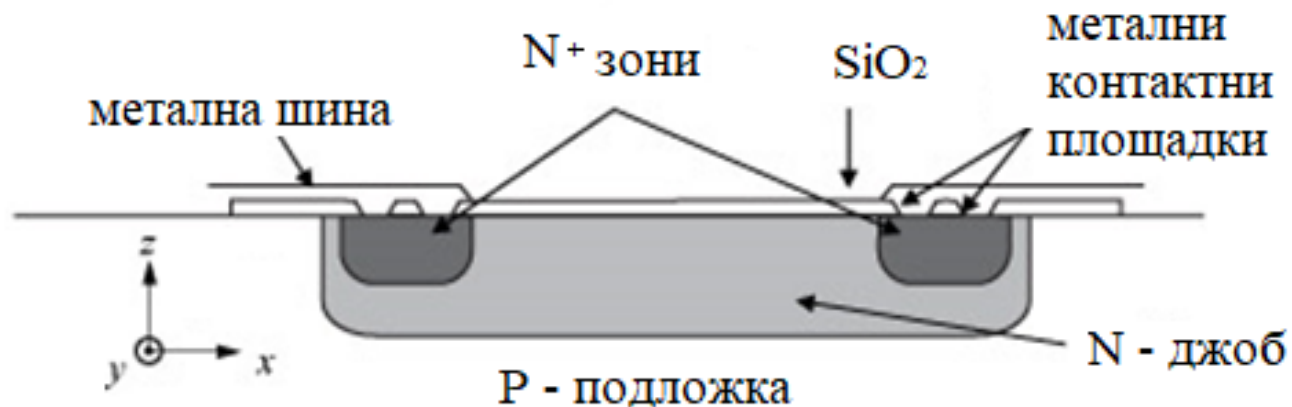
Структура с бондирани 2 отделни пластини за подобряване на отношението сигнал/шум



Изгледи на мембрани в различни конструктивни изпълнения

Сравнение на видовете сензори за налягане извън акустичния диапазон

- Пиезорезистивен MEMC

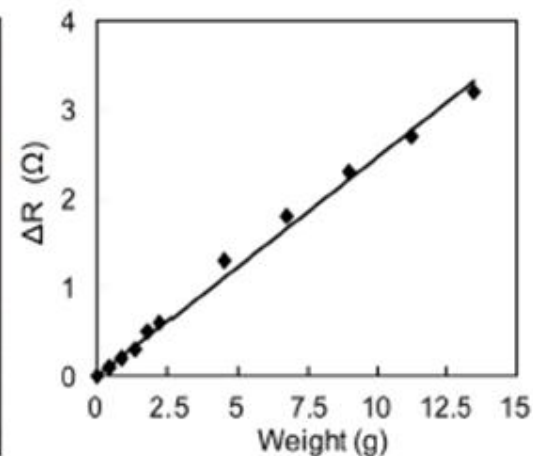
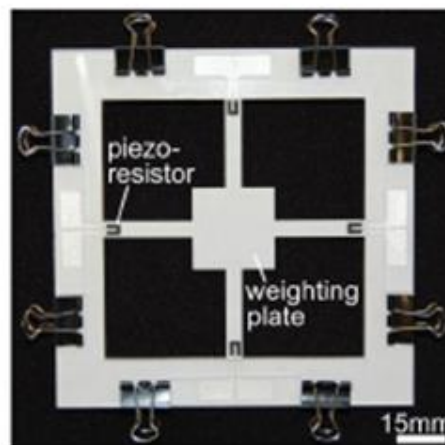
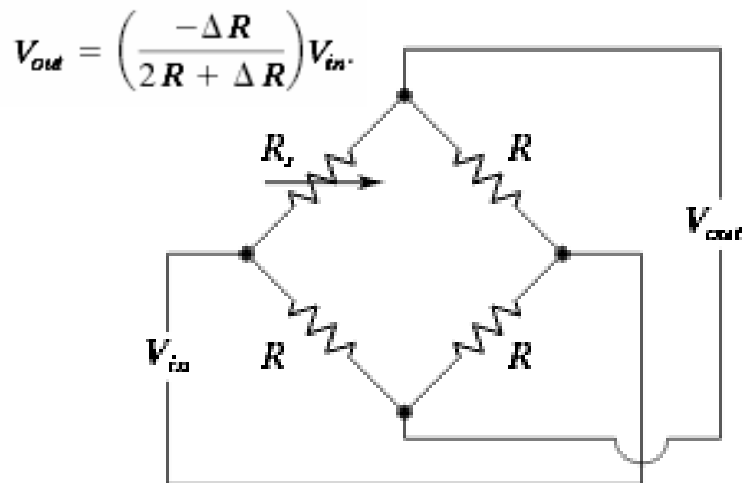


$$\rho_{\sigma} = \frac{\left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho}\right)}{\epsilon}$$

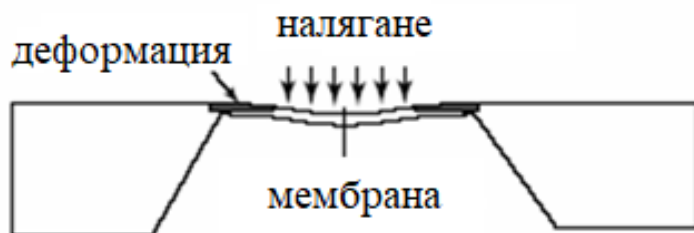


В числителя е изменение на съпротивлението към началното съпротивление ρ при прилагане на деформация ϵ . Типични примери за материали, проявяващи пиезорезистивен ефект, са поликристален силиций (PolySi) и силициев карбид (SiC).

За отчитане на изменението на налягането пиезорезисторът е включен в Уитстонов мост.



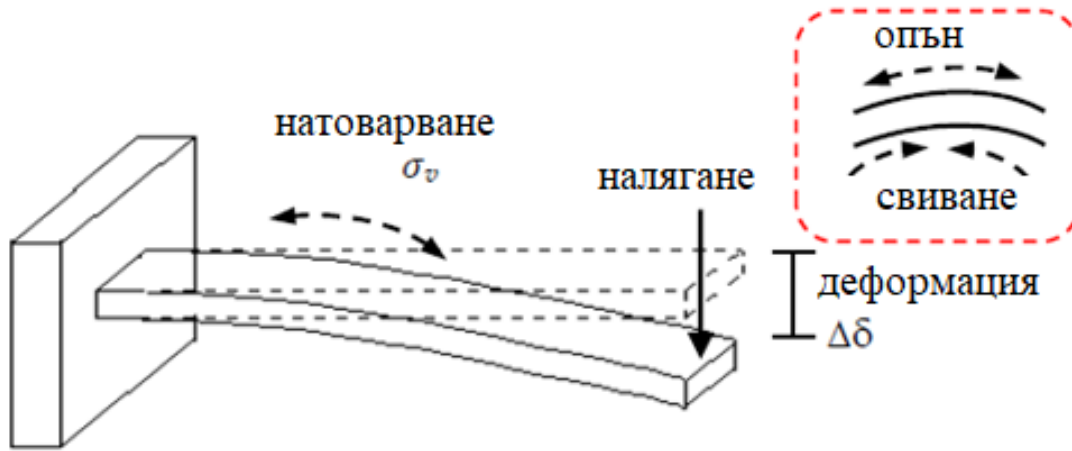
пиезорезистивен
меандър



За разлика от пиезоелектриците, работещи при честоти от порядъка на MHz, пиезорезистивните елементи са нискочестотни или статични.

Нелинейността им е под 0.5%.

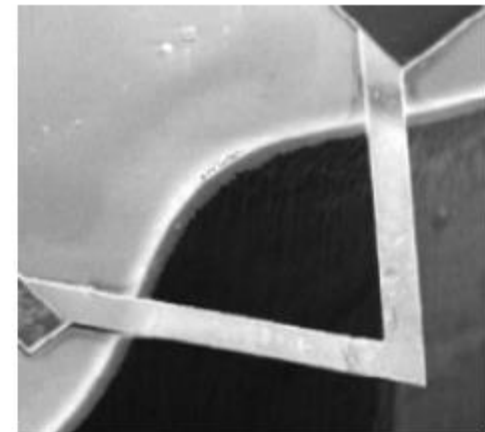
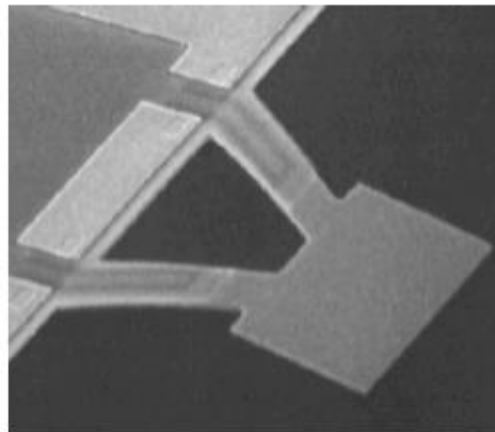
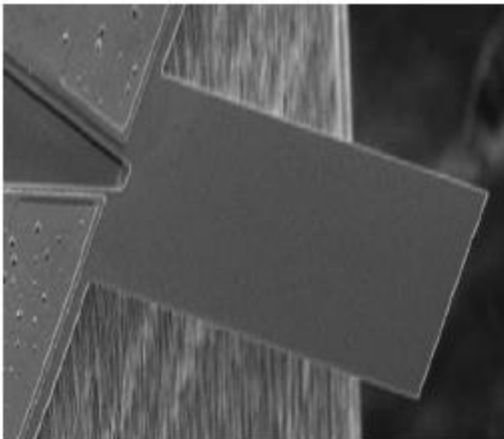
- Пиезорезистивен конзолен тип сензор (кантилевър)- за измервания в обхвата на МРа



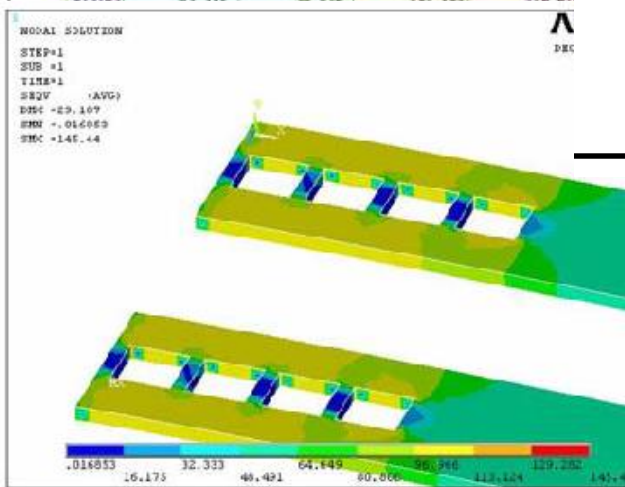
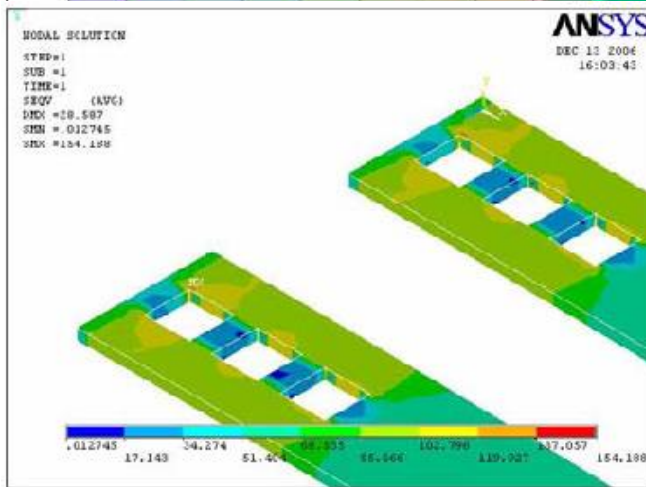
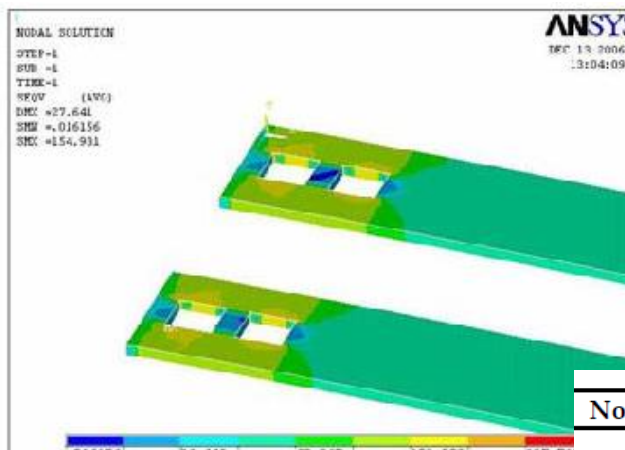
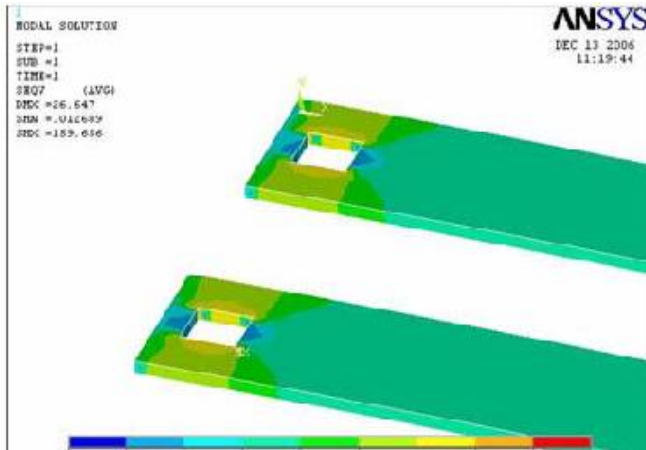
$$\delta_{\max} = \frac{Fl^3}{3EI}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = G \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

F – сила предизвикана от промяна в налягането; l (small L) – дължина на рамото на конзолата; E – модул на Юнг; I (capital i) – инерциален момент; G - геометричен фактор, определящ степента на отклонение според теглото на върха на кантилевъра (микроскопските снимки отдолу).



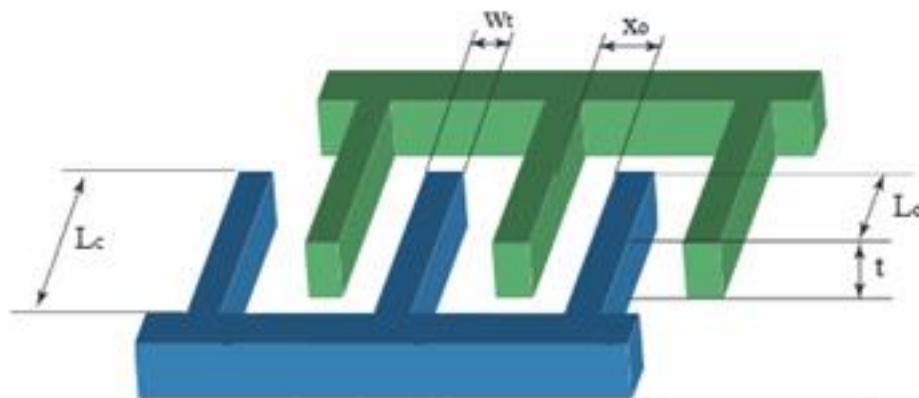
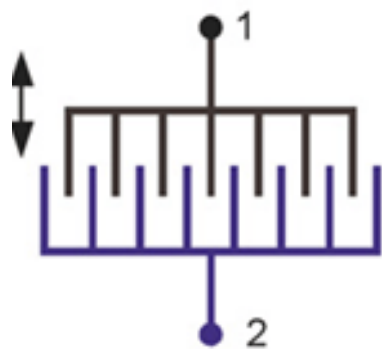
Концентратори на механично напрежение за разширяване на динамичния диапазон



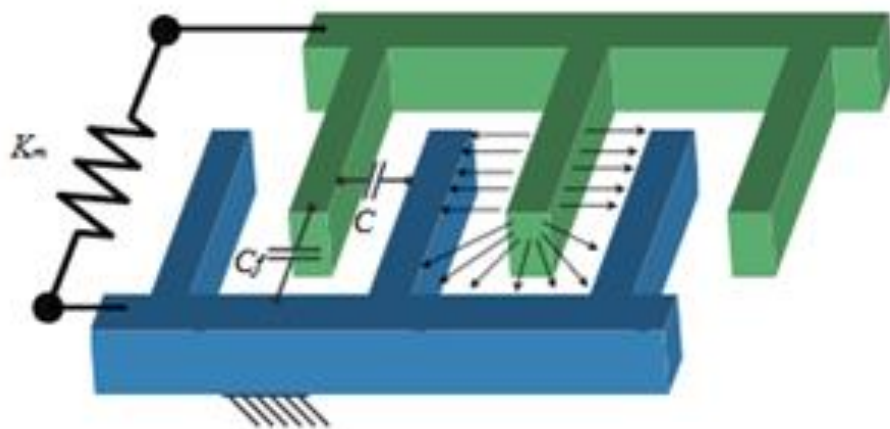
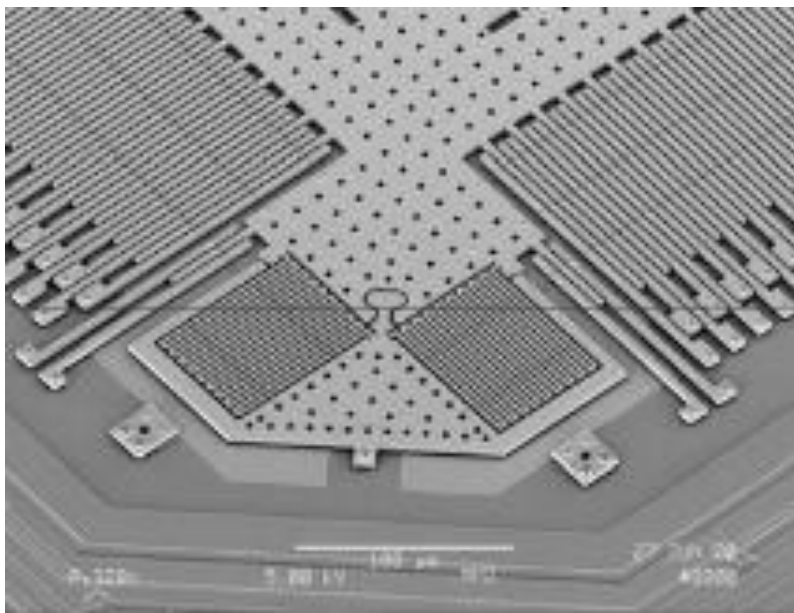
No. of Holes	Maximum Stress (MPa)
0	72.47
1	159.66
2	154.93
3	154.19
4	153.89

Разпределение на налягането по конзолата при добавяне на отвори – дизайнът може да се симулира и в модули Coventor и COMSOL Mechanics

- Капацитивни гребенчати сензори на налягане (чувствителни към промяна в площта на взаимно припокриване на електродите)



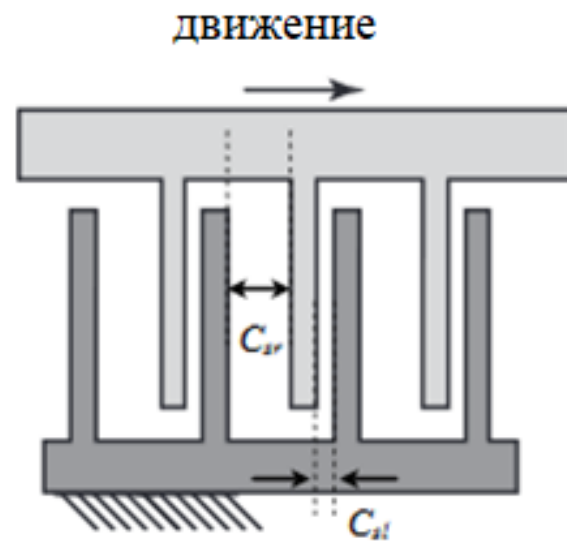
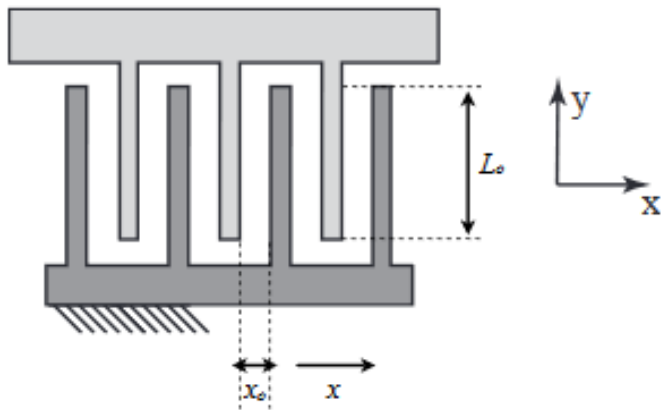
$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_o L_o t}{x_o}$$



$$C_{total} = C + C_f$$

Реагира на изменение на два вида капацитети, формиращи между подвижния и неподвижен „гребен“ с електроди.

Акселерометър [Analog Devices]



Когато горният „гребен“ се отклони надясно, капацитетът ще се промени между „пръстите“ му, както следва:

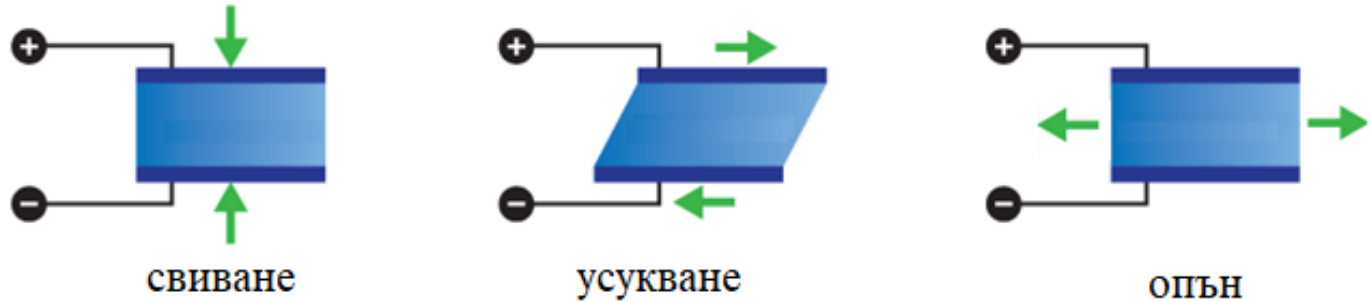
$$C_{sr} = \frac{\epsilon_0 L_0 t}{x_0 + x}$$

$$C_{sl} = \frac{\epsilon_0 L_0 t}{x_0 - x}$$

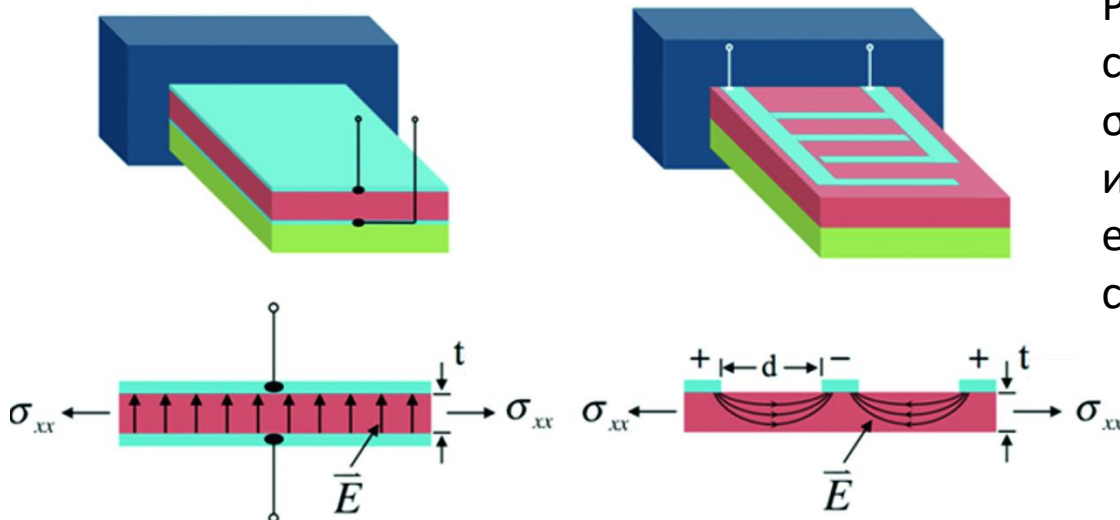
- Съвместима структура със силициевата MEMC технология
- Линеиност на характеристиката дори при големи амплитуди на изменение на налягането
- Малък температурен дрейф

- Пиезоелектрични сензори за вибрационно налягане

Резонансната честота на елемента трябва да съвпада с основната честота на вибрациите.



За оптимална работа на устройството, е важно пиезопреобразувателят да се ориентира така, че посоката на външно въздействие да съвпадне с максималната чувствителност на материала към това въздействие.



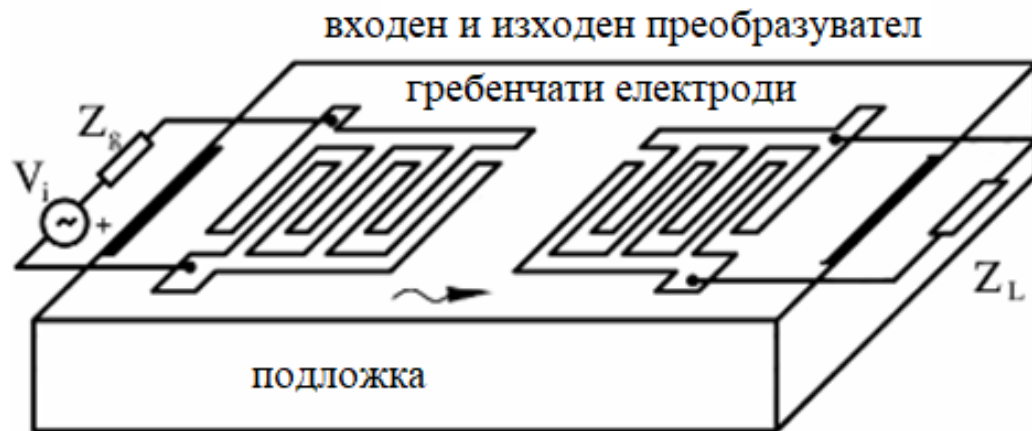
Разположението на електродите спрямо механичната деформация σ също е от значение за ефективно извличане на генерираната електрическа енергия E , която да се измери.

Основни материали и техните свойства, използвани при пиезоелектричните сензори за налягане, както и най-подходящите за омов контакт електроди

	PZT	ZnO	PVDF
d_{31}, pC/N	180	5	6-10
d_{33}, pC/N	360	12,4	13-22
g_{31} , Vm/N	0,011	0,36	0,14
g_{33} , Vm/N	0,025	1,57	0,22
k	0,35-0,69	0,33	0,10-0,15
Y, GPa	49-63	30-200	8,3
ϵ_r	1700	10-11	10-12
Технология	Вакуумно разпрашване	Вакуумно реактивно разпрашване	Пулверизиране/центрофугиране

Вид електрод	Адхезивен слой	Материал за електрода
Au/Cr: Злато/хром	Хром: 10 nm	Злато: 100 nm
Pt/Ta: Платина/тантал	Тантал: 5 nm	Платина: 135 nm
Pt/Ti: Платина/титан	Титан: 5 nm	Платина: 135 nm

- Сензори с повърхностни акустични вълни (ПАВ)



БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!