



МТФ
СИЛАТА НА ТЕХНОЛОГИИТЕ

MEMS акселерометри

Проф. д-р Тодор Ст. Тодоров
tst@tu-sofia.bg
ТУ-София, 2015



Съдържание

1. Основни понятия
 2. Видове акселерометри
 3. Характеристики на акселерометрите
 4. MEMS капацитивни акселерометри
 5. Термокондуктивен MEMS акселерометър
 6. Термоконвективен MEMS акселерометър
 7. Термомехурен акселерометър
 8. Тунелен акселерометър
 9. Резонансни акселерометри
 10. Оптични акселерометри
 11. Пиезорезистивни акселерометри
 12. Пиезоелектрични акселерометри
 13. Динамичен модел на акселерометър
 14. Еволюция на размерите при MEMS акселерометрите
- Литература

1. Основни понятия

Инерция е способността на телата да поддържат постоянна скорост или ъглова скорост, докато не им въздейства сила [1].

Инерциална координатна система е тази, за която са валидни законите за движение на Нютон, не се ускорява или върти [1].

Измервателни оси – линейни или ъгови единични вектори, с които се обозначават посоките, в които се измерват инерционните параметри.

Инерционен сензор е измервателен елемент, който е захванат към напълно защитен корпус и който се стреми да определи изменението на позицията и/или ориентацията на корпуса по отношение на външна инерциална координатна система [2].

Инерционен актуатор е механична система, в която промяната на позицията и/или ъгловата ориентация на изходното звено се дължи на инерционни сили.

Акселерометър е сензор за измерване на линейно и гравитационно ускорение.

Жироскоп е сензор за измерване на ъглова скорост спрямо ос.

Инклинометър (тилт сензор) е сензор за измерване на наклон.

Харвестер – микро генератор (преобразувател) на неоползотворена енергия.

Инерционен измервателен модул е устройство, съставено от триосеви жироскоп, акселерометър и компас (магнитомер), разположени в общ корпус с обща координатна система.

2. Видове акселерометри

В зависимост от размерите l на характеристикните елементи акселерометрите биват: конвенционални (макро) $l > 1 \text{ mm}$; MEMS $200 \text{ nm} > l > 1 \text{ nm}$.

В зависимост от броя на осите, по които се измерва ускорението акселерометрите биват: едноосеви, двуосеви и триосеви.

В зависимост от принципа на преобразуване на инерционните параметри акселерометрите се делят на: пиезорезистивни, капацитивни, пиезоелектрични, тунелни, оптични, термоконвективни, микромехурни, лазерни, с повърхностно акустични вълни, резонансни, електромагнитни, с ефект на Хол.

В зависимост от диапазона на измерваното ускорение: за ниско ускорение (Low-g Accelerometers) – за диапазон от ± 1 до $\pm 20 \text{ g}$. Намират приложение в автомобилната техника (навигация), защита на HDD, лаптопи, мобилни телефони, кинокамери, системи за управление и сигурност. Тук с $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ е означено земното ускорение.

Широко-диапазонни акселерометри (High-g Accelerometers) от ± 20 до $\pm 250 \text{ g}$. За автомобилните предпазни възглавници, в медицината, за измерване на удари и вибрации.

3. Характеристики на акселерометрите

Основни характеристики:

- **Чувствителност (Sensitivity)** [mV/g] – отношението на изменението на изходния сигнал към изменението на входния сигнал;
- **Нелинейност (Non-linearity, Sensitivity Accuracy)** (точност) %;
- **Работен диапазон (Range)** [g];
- **Работна честотна лента (Bandwidth)** [Hz] - определя се от механичната резонансна честота на сензора до ниво от 3 dB;
- **Отместване (0G offset)** – ниво на изходния сигнал при нулево ускорение на входа
- **Плътност (интензивност) на шума (Noise density)** [$\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$] . Това е средно квадратичния шум на ускорението на сензора при номинално захранващо напрежение U_{DD} и номинална температура. Ускоренията, които са под тази стойност, сензорът не може да различи.

Допълнителни характеристики:

- **Работен диапазон на захранващото напрежение (Supply voltage)** [V];
- **Работен диапазон на захранващия ток (Supply current)** [A];
- **Температурен работен диапазон (Temp. range)** [°C];
- **Паразитна (кръстосана) чувствителност при преместване по съседна ос (при 2 и 3 осевите акселерометри) (Cross-axis Sensitivity)**. Показва каква е чувствителността по ос x по отношение на сигнала по ос y например.

Експлоатационни параметри:

- Електростатична устойчивост (ESD Tolerance);
- Устойчивост на механични удари (Mechanical Shock)

Понеже чувствителността зависи от температурата и захранващото напрежение за корекция на показанията понякога се въвеждат параметрите:

- Температурно отместване (Offset vs Temperature) – разлика на изходните напрежения получени при минимална и максимална работна температура и при нулево ускорение т.е. При покой на сензора.
- Грешка на измервано съотношение (няма утвърден превод на български, смислово е относително-метрична) (Ratiometric error) – показва колко се изменя чувствителността в % при промяна на захранването с $\pm 5\%$.

Допълнителни данни за акселерометрите:

- Брой на измерваните оси – 1-z; 2- x,y; 3 – x, y, z.
- Вид на изходния сигнал – аналогов, цифров, ШИМ, интерфейс, с вградена система за обмен на данни т.е. имат цифров интерфейс, който не само дава измервания сигнал, но и създава възможности за програмиране на измервателния процес.
- Тип на корпуса - ако е нестандартен, се дават габаритите;
- Тегло.

4. Капацитивни акселерометри

Предимства на капацитивните акселерометри [4]:

- Висока чувствителност (50mV/g – 900mV/g);
- Ниска температурна чувствителност дължаща се на газовия диелектрик;
- Може да измерват ускорения с много ниска честота;
- Ниска мощност на цифровия интерфейс (от 10 до 100 μ W);
- Висок температурен интервал;
- Не изискват специални материали.

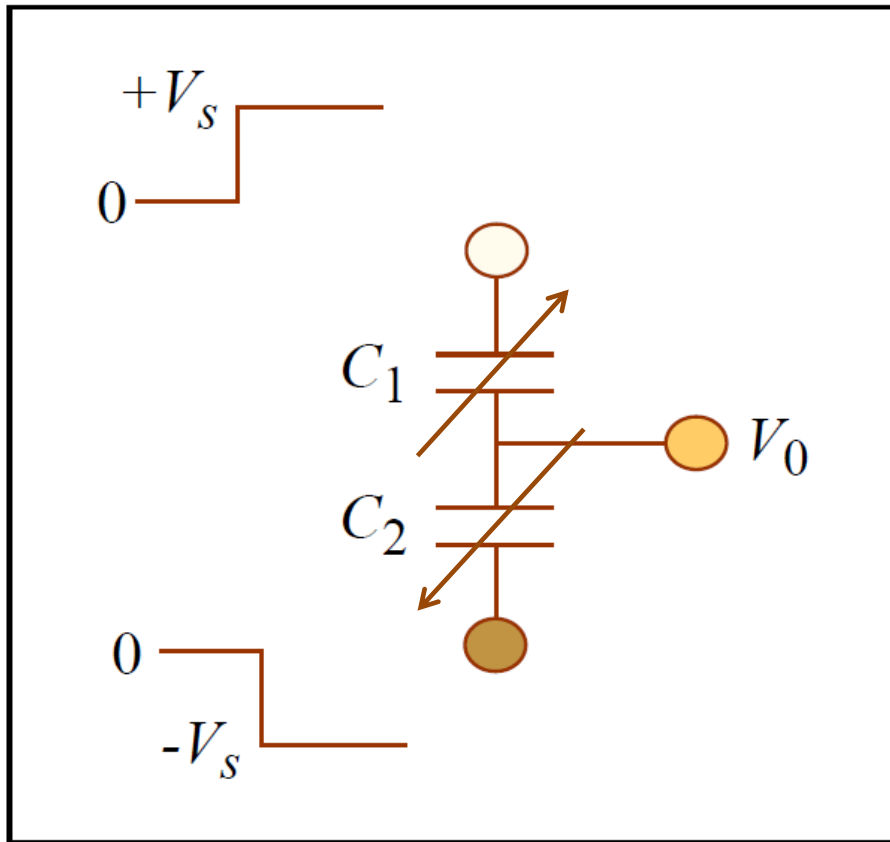
Недостатъци

- Ниска честотна лента (собствената честота е няколко kHz);
- Сложна електронна част.

Подходи за измерване на ускорението [3]:

- Отворена схема: промяната на измервания параметър е в следствие на ускорението;
- Затворена схема: разстройването на позицията на контролната система вследствие на ускорението променя стойността на сигнала в отрицателна обратна връзка;
- Квази–статично: измерва се честотата на ускорението или преместването предизвикано от ускорението;
- Резонансно: измерва се резонансна честота на позиционно зависима нелинейна пружина.

Измерване на капацитет при диференциално свързани кондензатори



$$V_0 = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2} 2V_s = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_s$$

$$V_0 = \frac{\frac{\epsilon A}{g_2} - \frac{\epsilon A}{g_1}}{\frac{\epsilon A}{g_2} + \frac{\epsilon A}{g_1}} V_s = \frac{\frac{1}{g_2} - \frac{1}{g_1}}{\frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_1}}$$

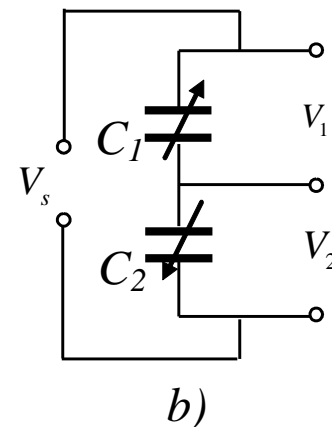
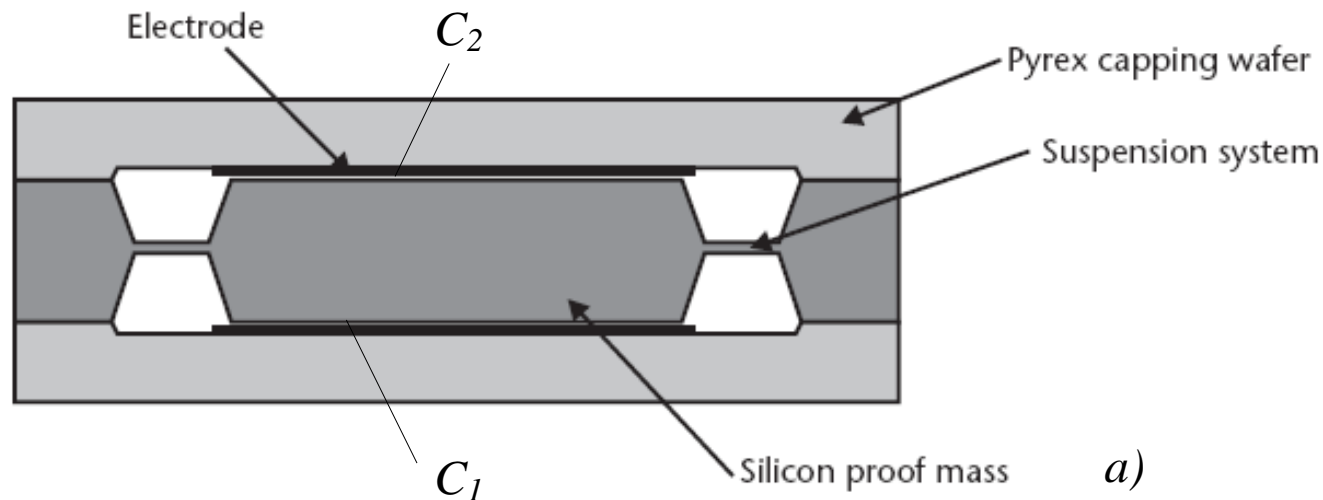
$$V_0 = \frac{g_2 - g_1}{g_1 + g_2} V_s$$

$$g_2 = g - x \quad g_1 = g + x$$

$$V_0 = \frac{x}{g} V_s$$

Фиг. 1. Изходното напрежение V_0 при зададените потенциали V_s за диференциална схема е пропорционална на преместването x на средния електрод [5].

Диференциален капацитивен акселерометър, изработен чрез обемна микрообработка.



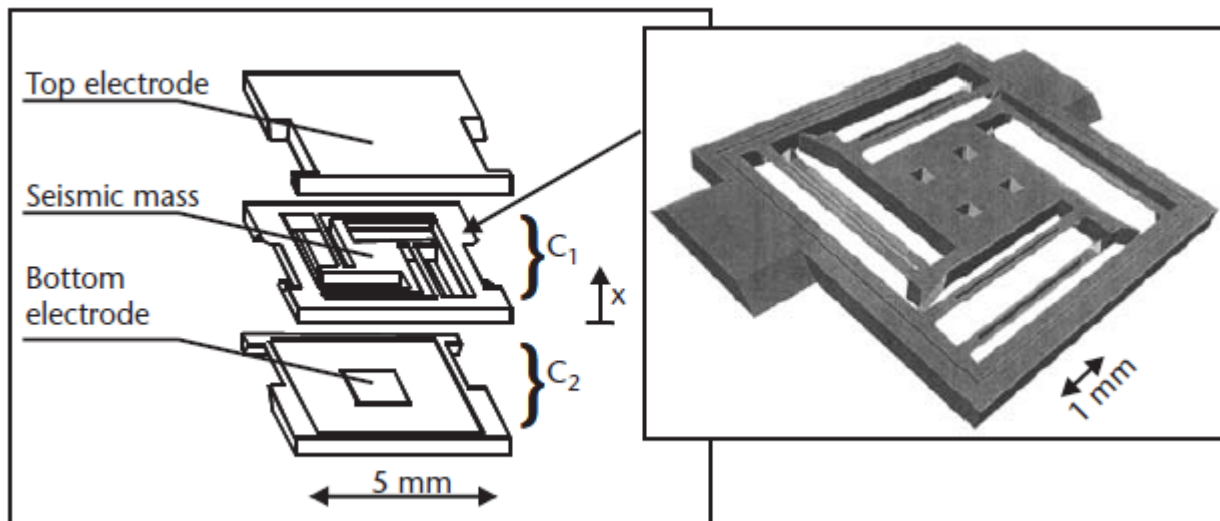
Фиг. 2. Структура на диференциален акселерометър [7].

$$V_1 = \frac{q}{C_1} \quad V_2 = \frac{q}{C_2}$$

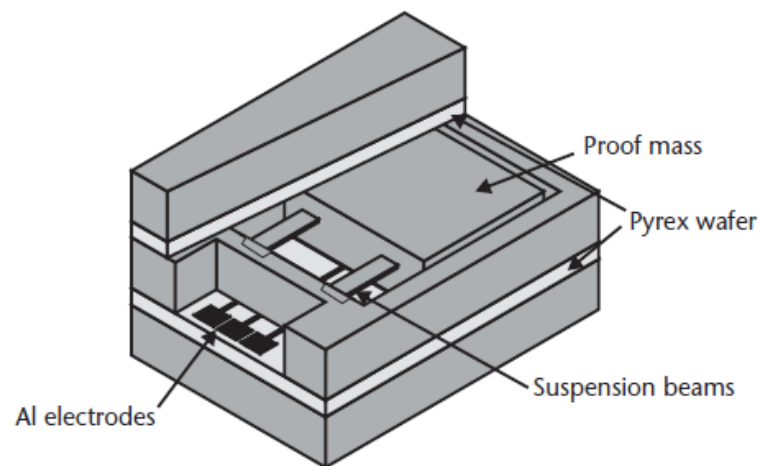
$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{g_0 - y} \quad C_2 = \frac{\varepsilon A}{g_0 + y}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1} \\ V_1 + V_2 = V_s \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_s \\ V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_s \end{array} \right.$$

$$V_{out} = V_2 - V_1 = \frac{V_s}{g_0} y$$

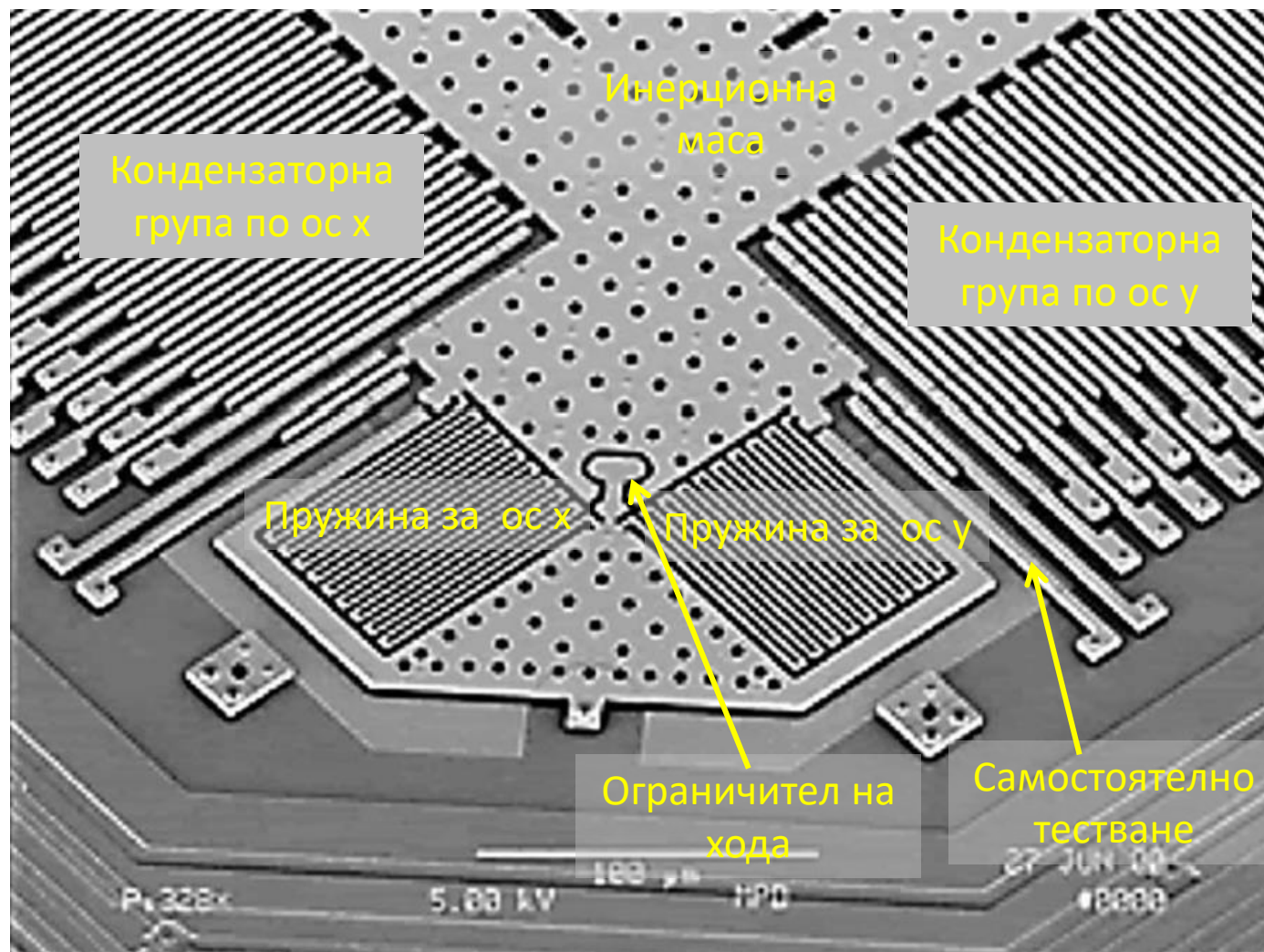


Фиг. 3. Една от първите обемно обработени структури на едноосев акселерометър [8].

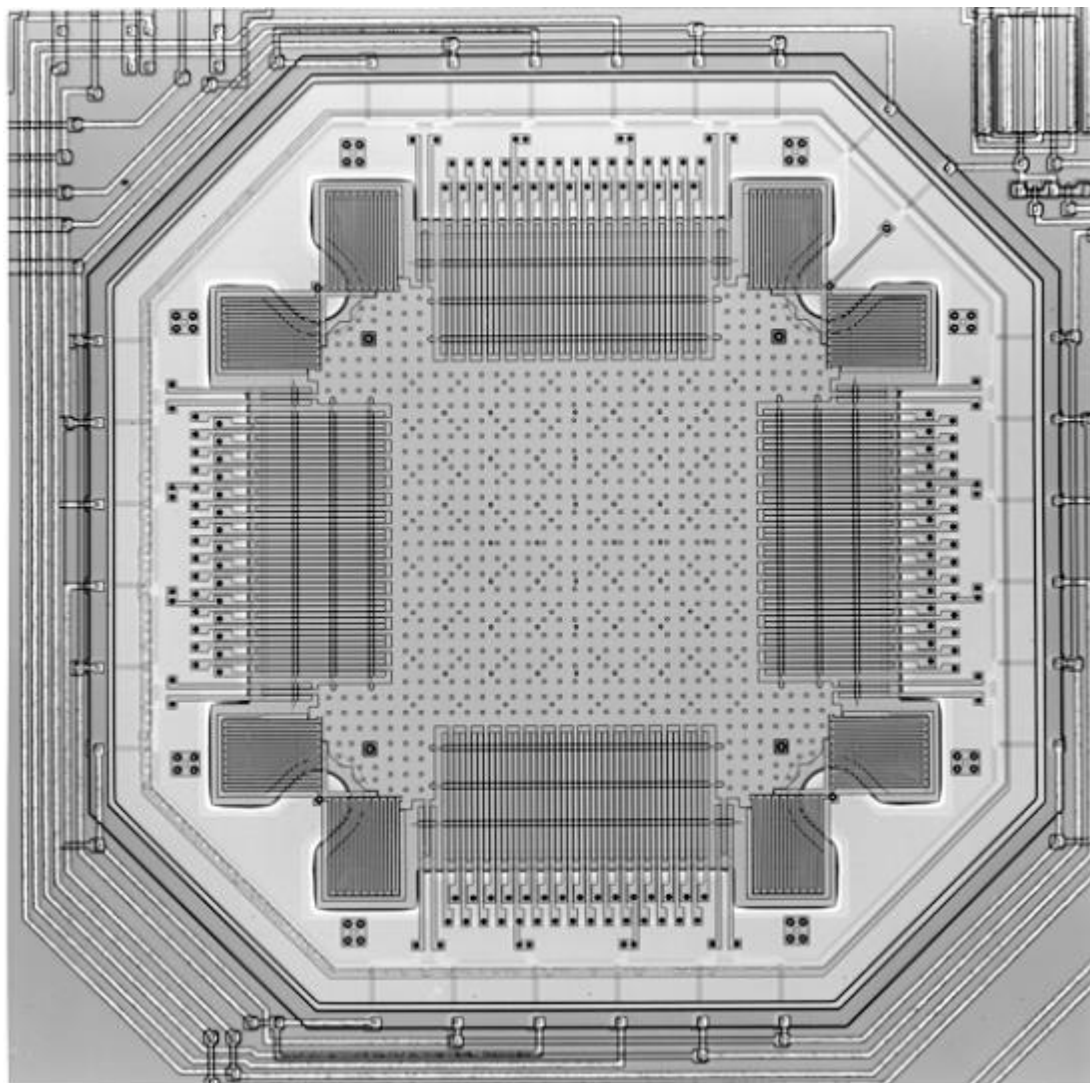


Фиг. 4. Една от първите обемно обработени структури на едноосев акселерометър с подобрени характеристики [9].

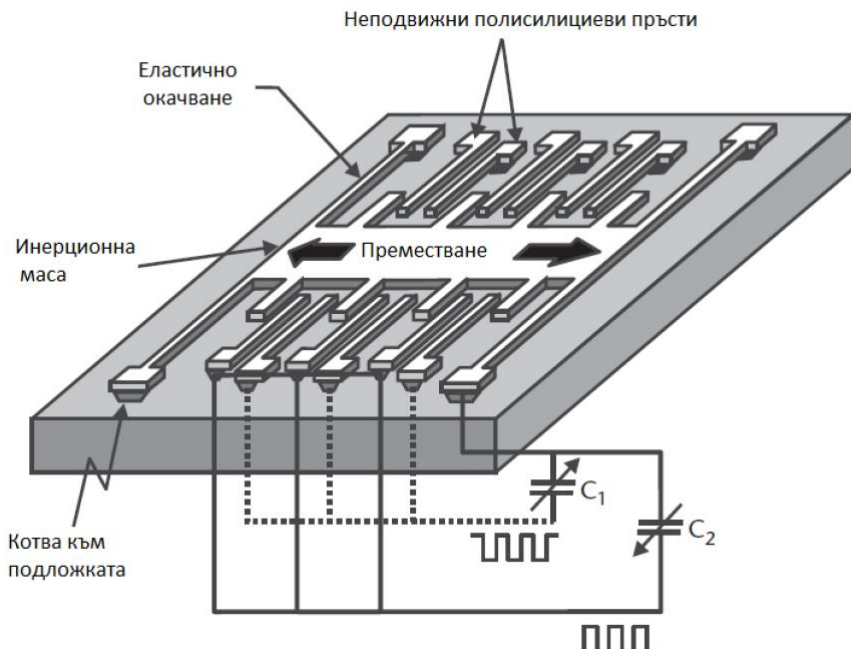
Диференциален капацитивен акселерометър, произведен чрез повърхностна микрообработка.



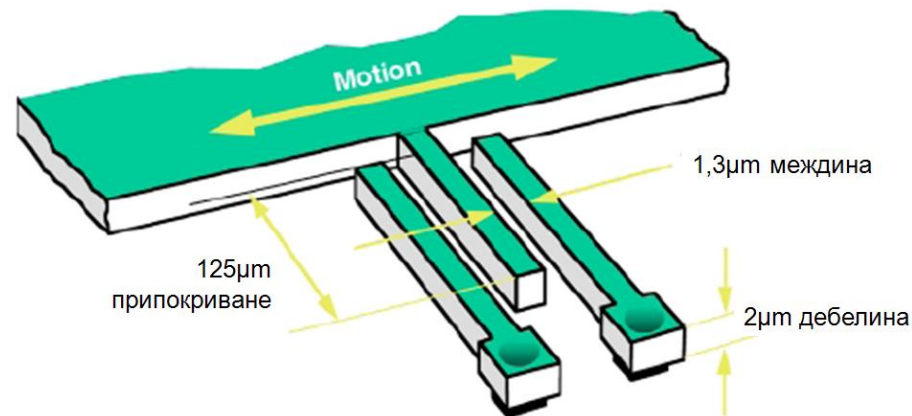
Фиг. 5. Сканиран електронен микрограф на ADXL 202 (Analog Devices) Inc. [6].



Механичната част на 2-осев акселерометър ADXL202

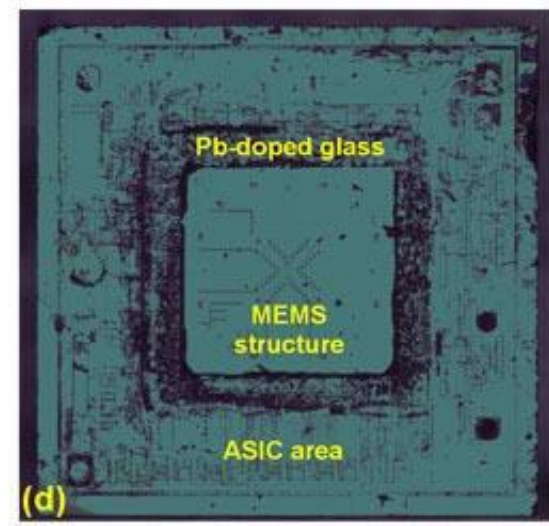
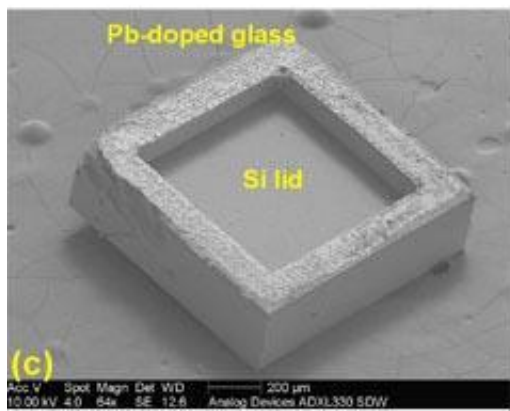
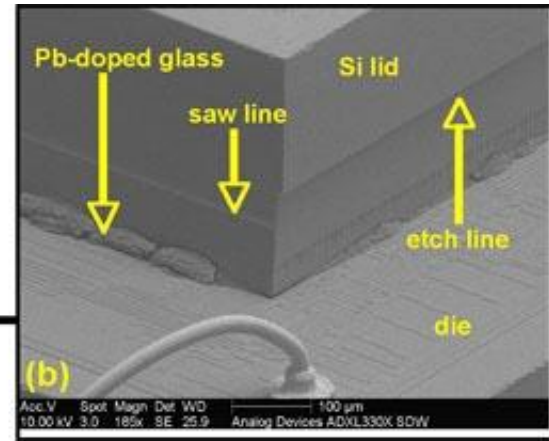
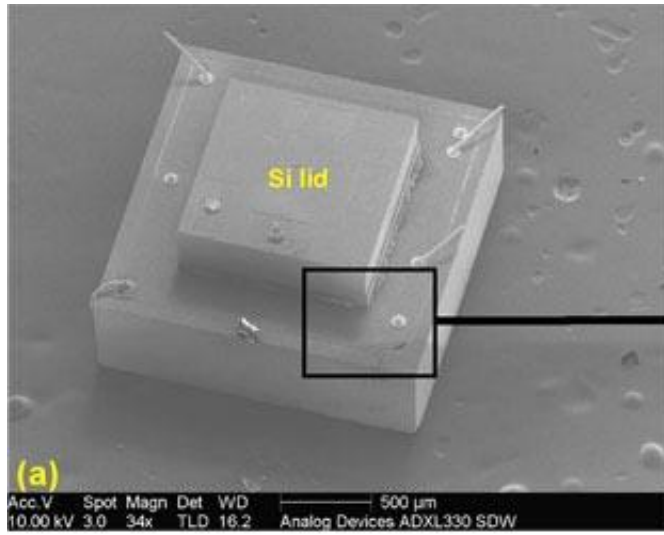


Фиг. 6. Опростена схема на едноосов акселерометър, произведен по технология за повърхностна микрообработка [6].

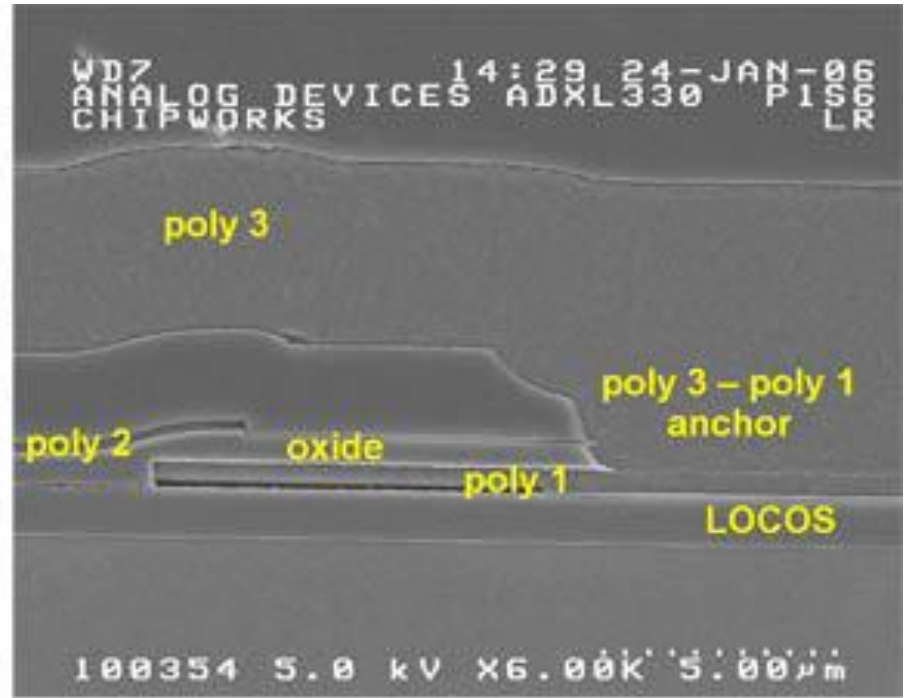
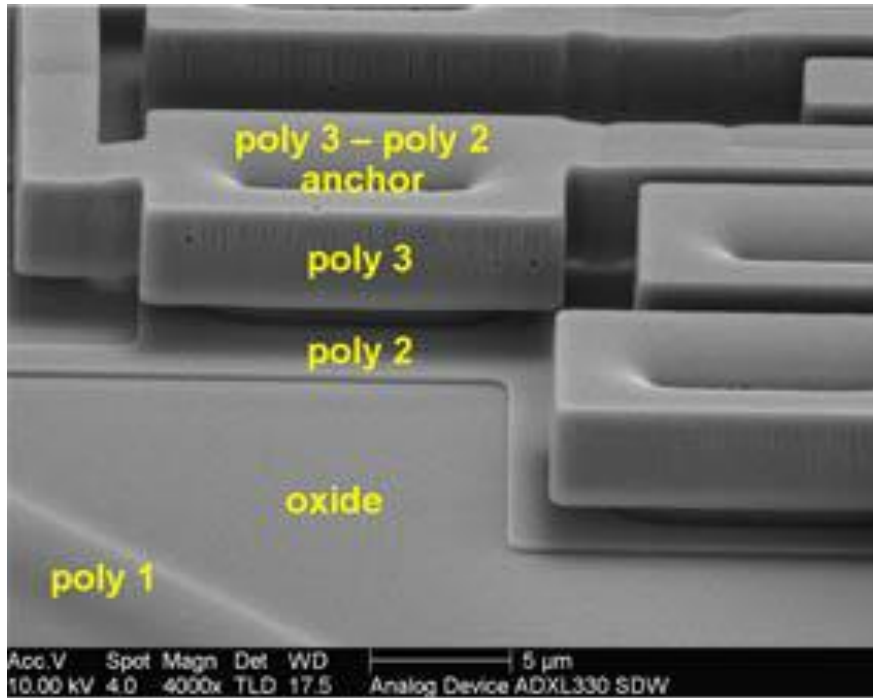


Фиг. 7. Размери на диференциалния кондензатор [7].

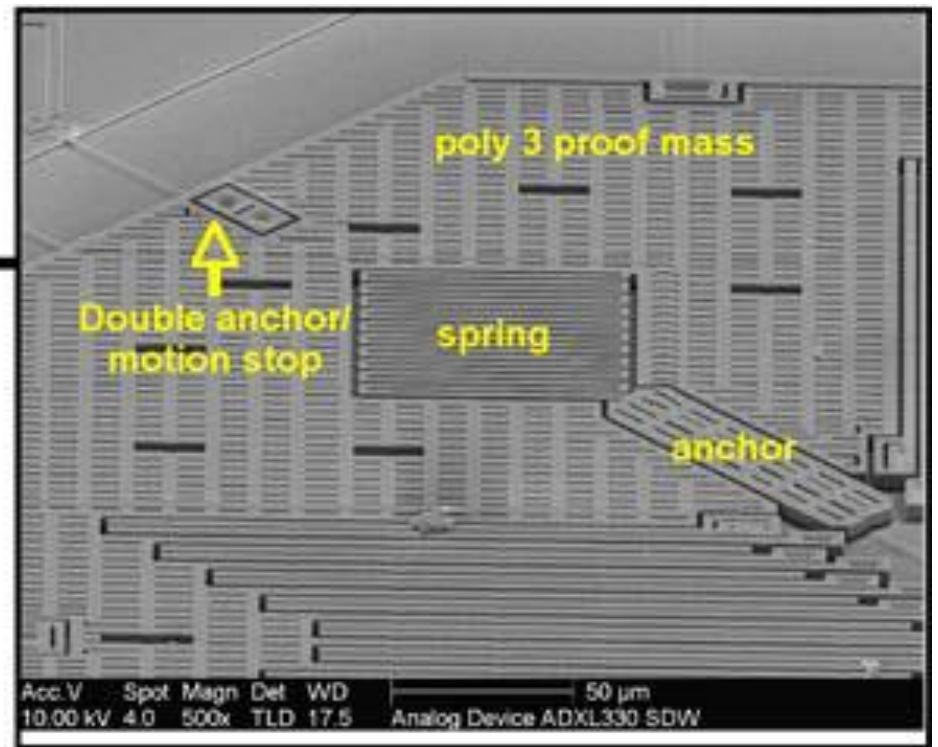
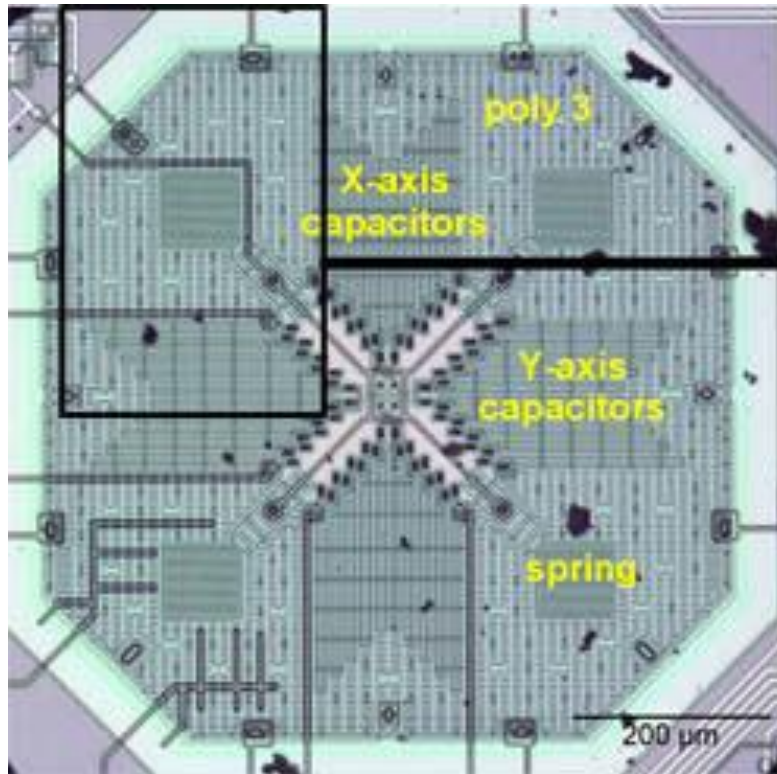
Поради малките разстояния капацитетът на тези диференциални кондензатори се е от порядъка на фемто фаради ($1\text{fF}=1.10^{-15}\text{F}$), а изменението на капацитета е ато фаради ($1\text{aF}=1.10^{-18}\text{F}$).



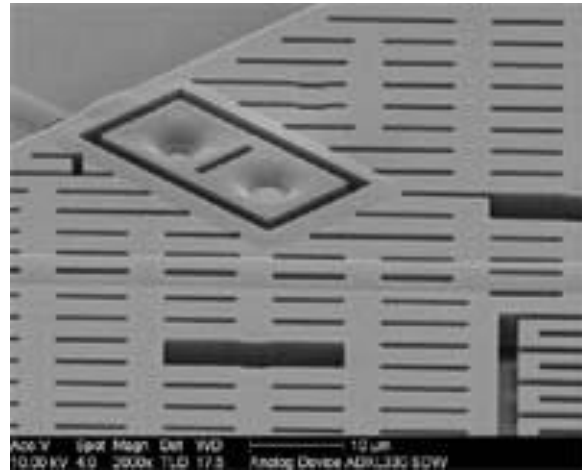
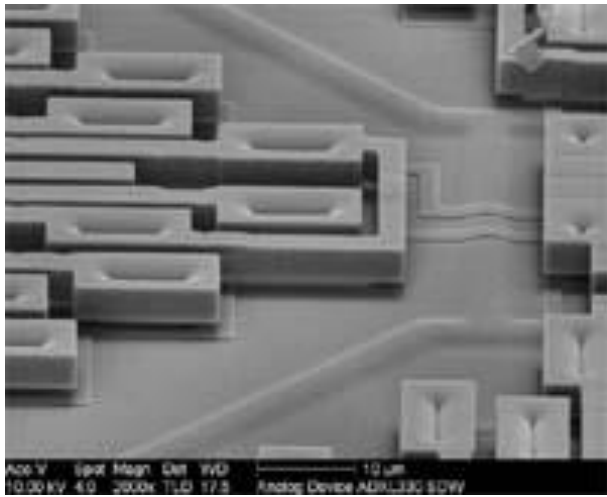
ADXL330



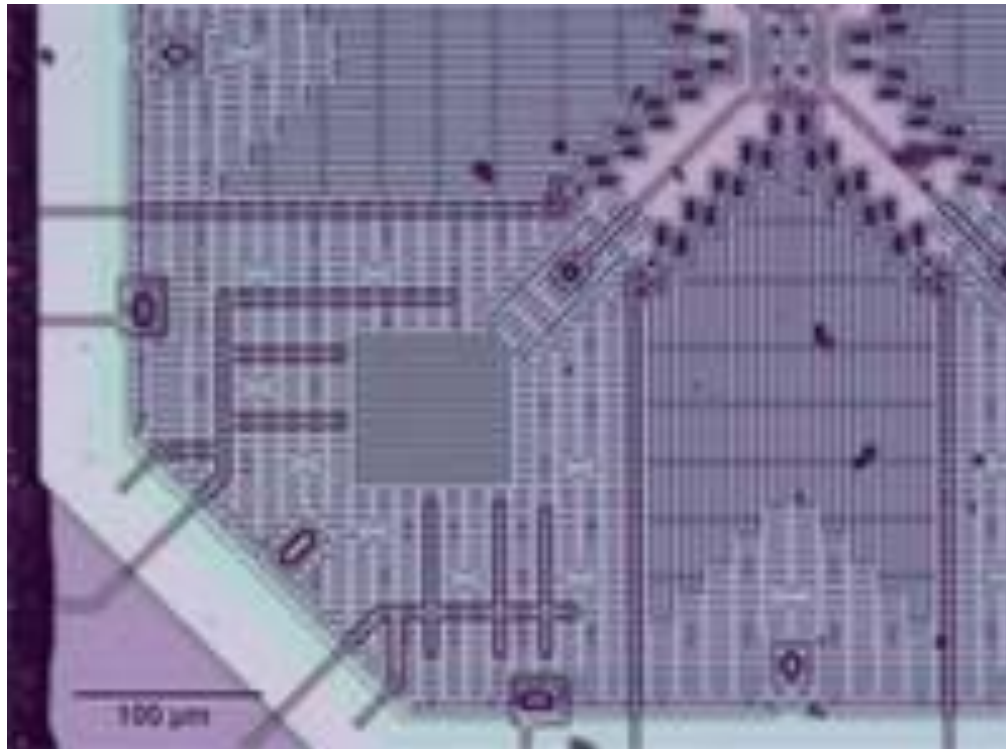
ADXL330



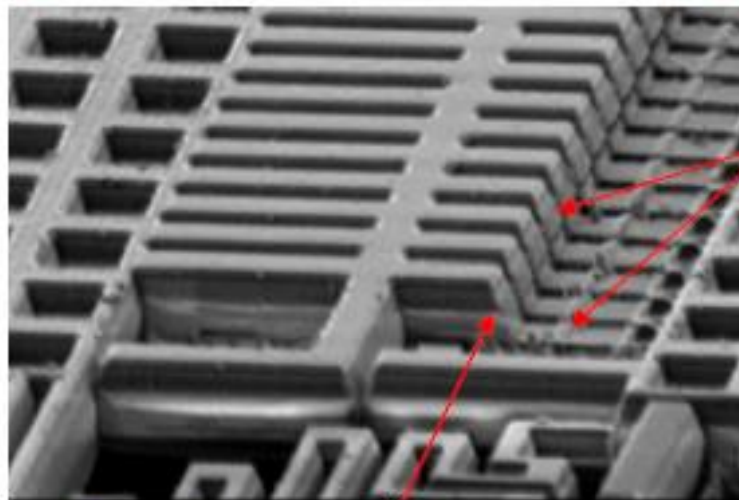
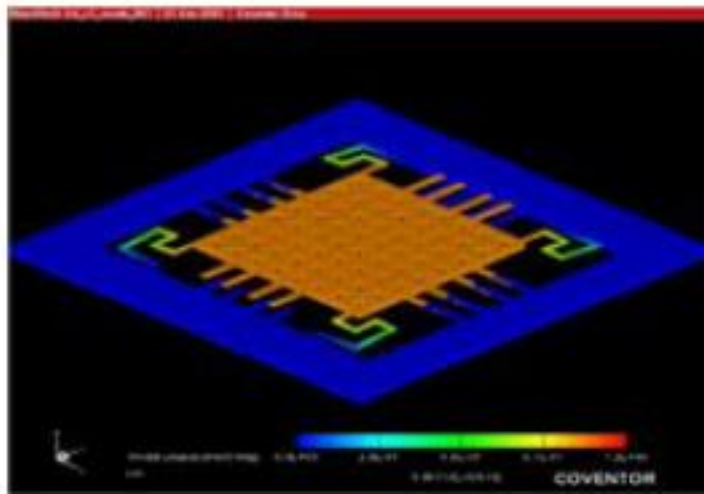
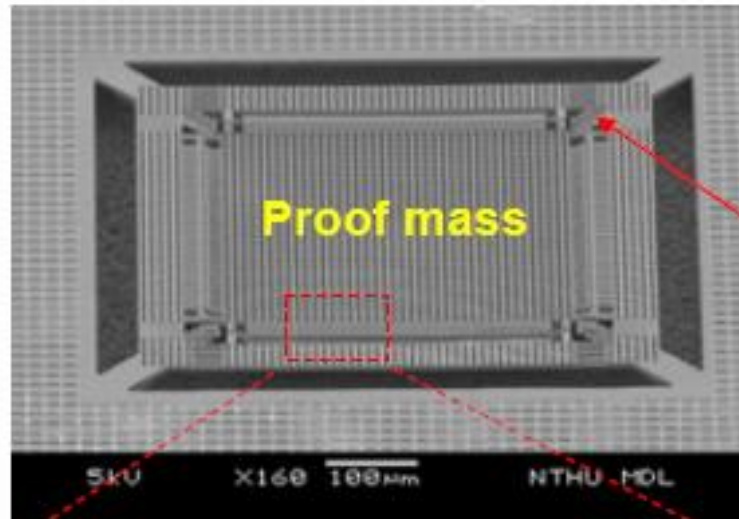
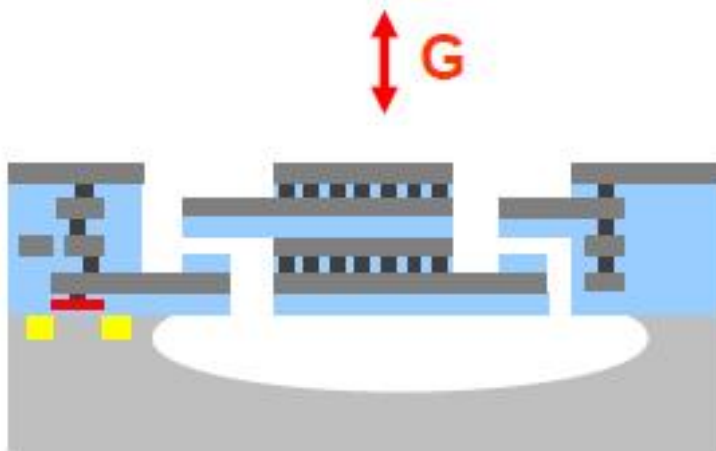
ADXL330



ADXL330



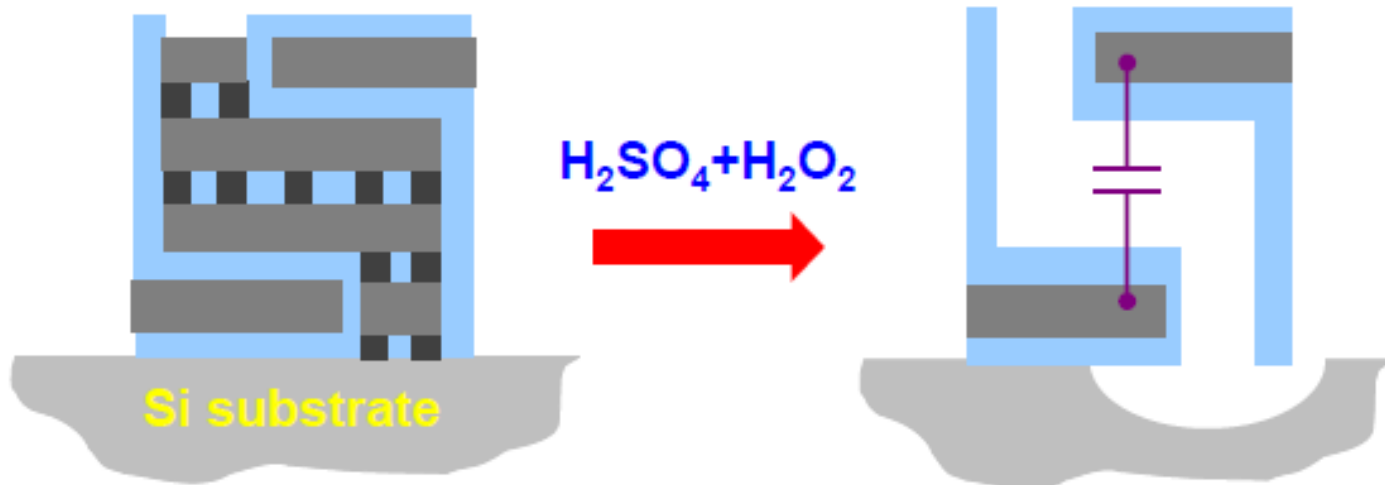
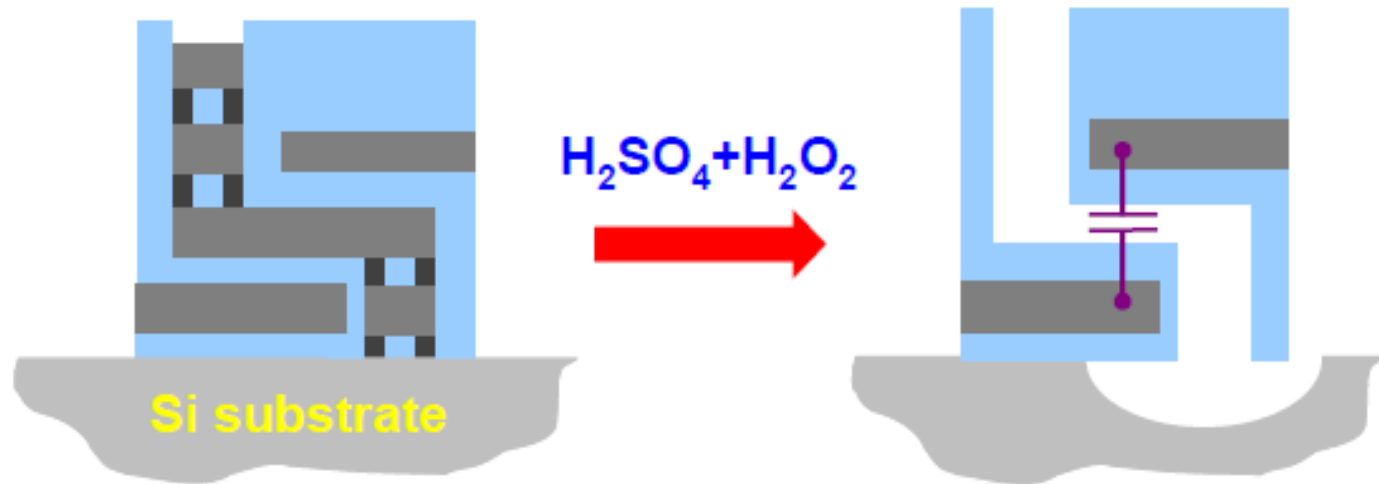
Out-of-plane (Z-axis) accelerometer



Wang, Sun, Tsai, and Fang, *JMM*, 2007

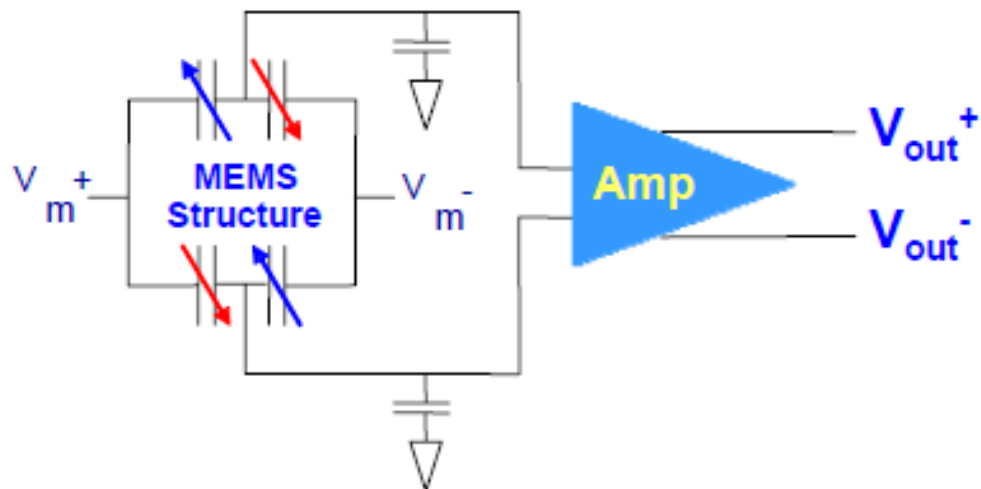
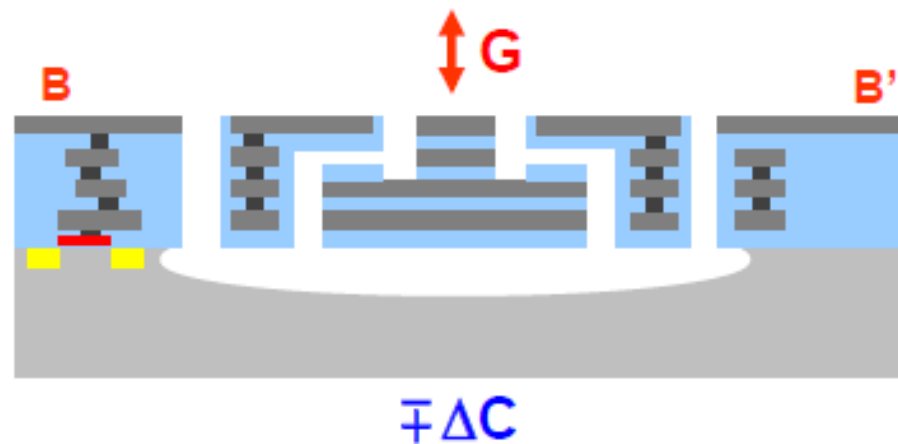
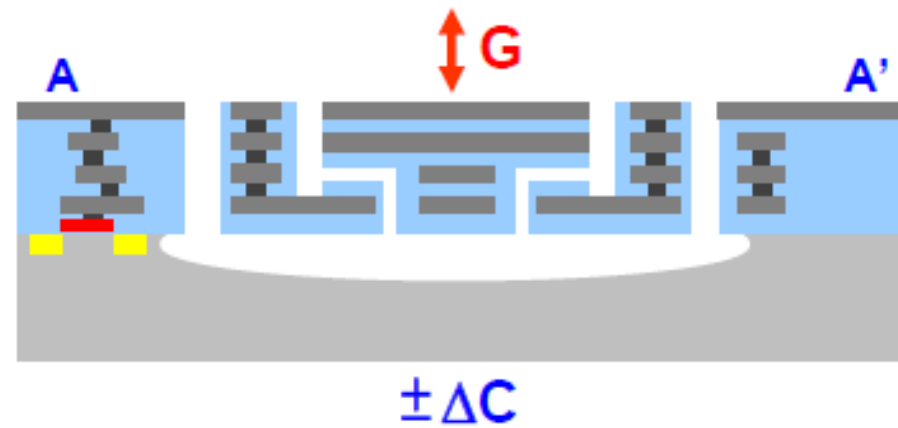
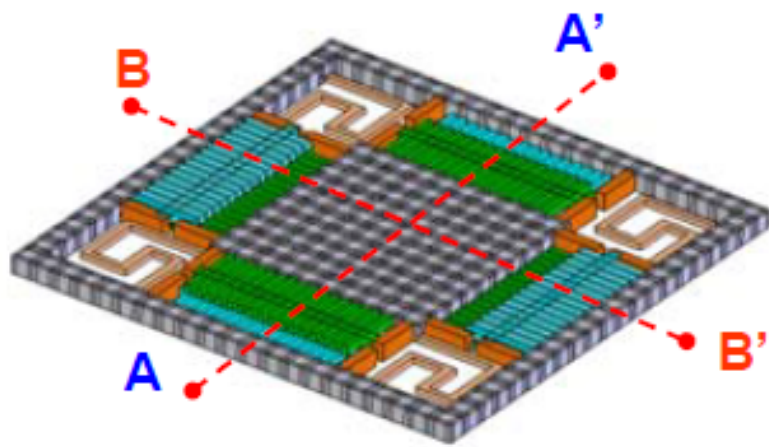
Tsai, Wang, Sun, and Fang, *Transducers'07*, Lyon, France, 2007

Gap closing electrodes design

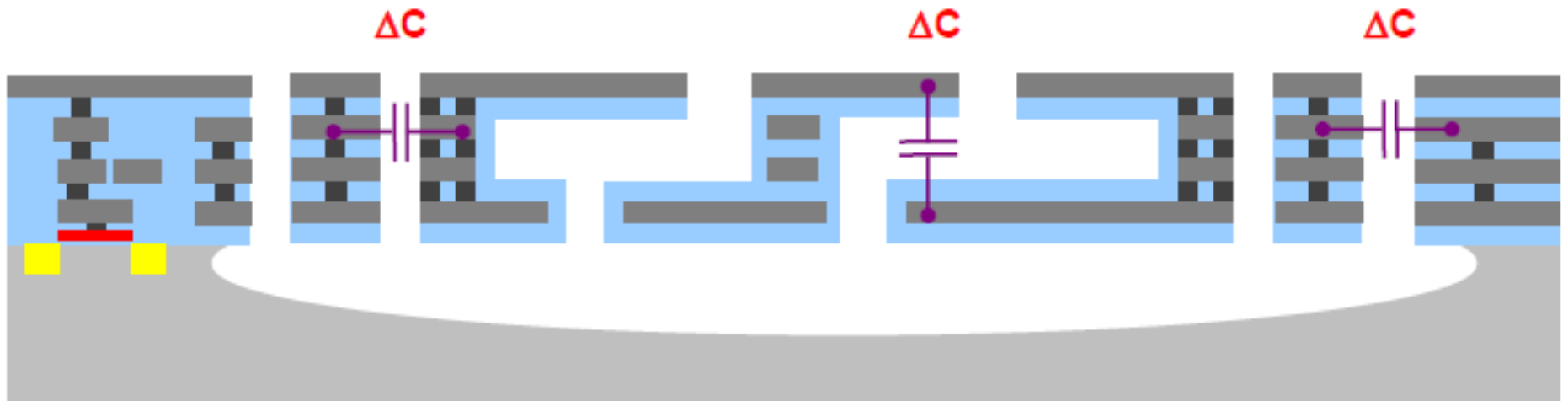
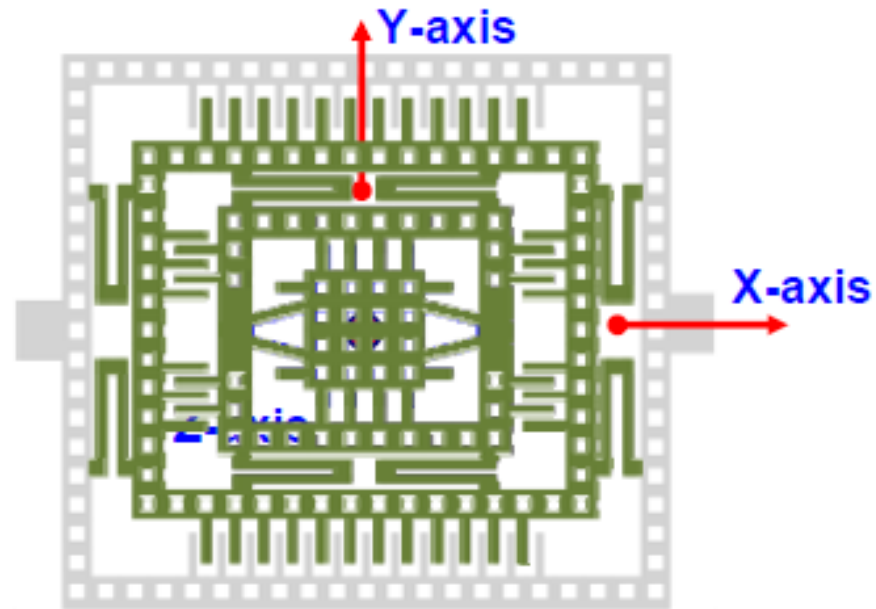


Tunable Sensing Gap/Moving space Design

Fully-differential sensing structure



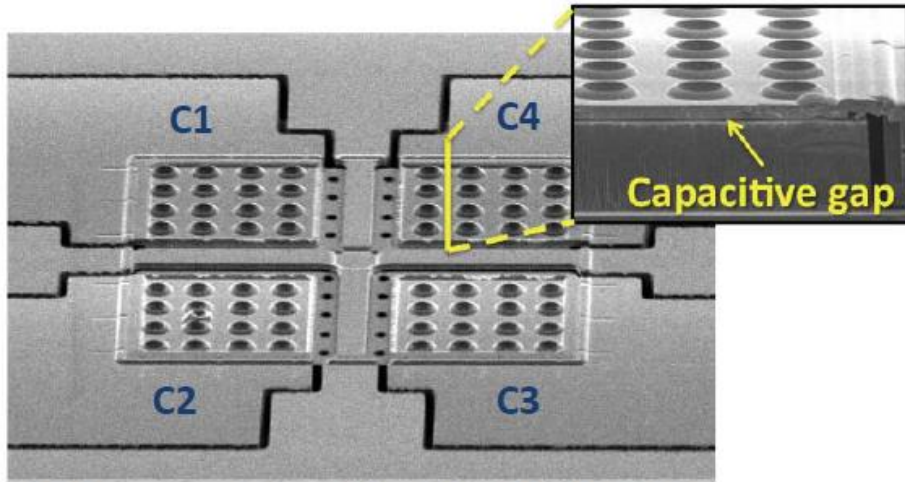
Tri-axis accelerometer (1 mass)



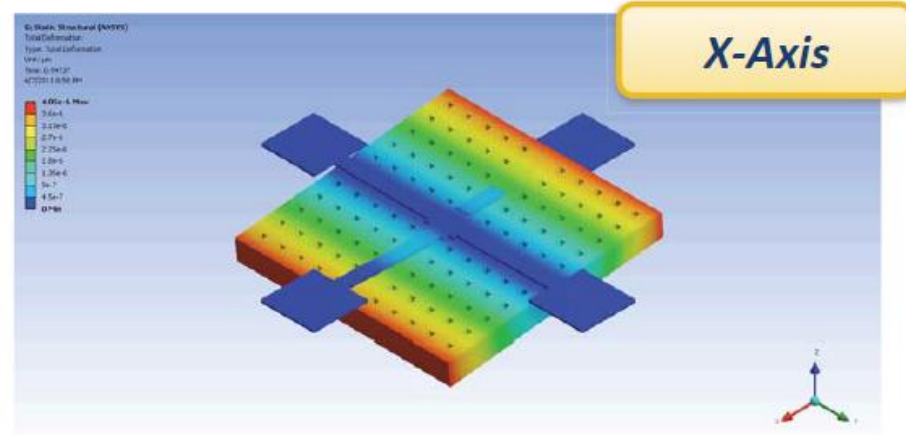
X-axis sensing unit

Триосев акселерометър с единична маса

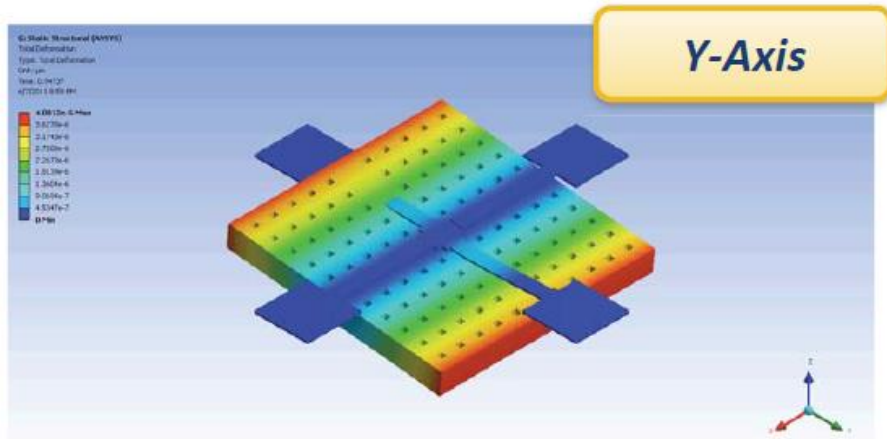
- Подобен на махало с четири горни електроди



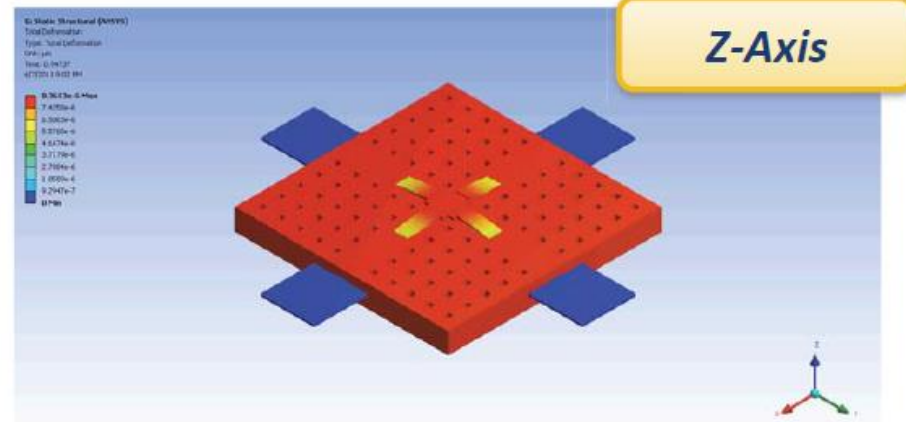
D. E. Serrano et al, to appear at IEEE MEMS, 2014



$$\Delta C_{TOT} = (C1+C2) - (C3+C4)$$

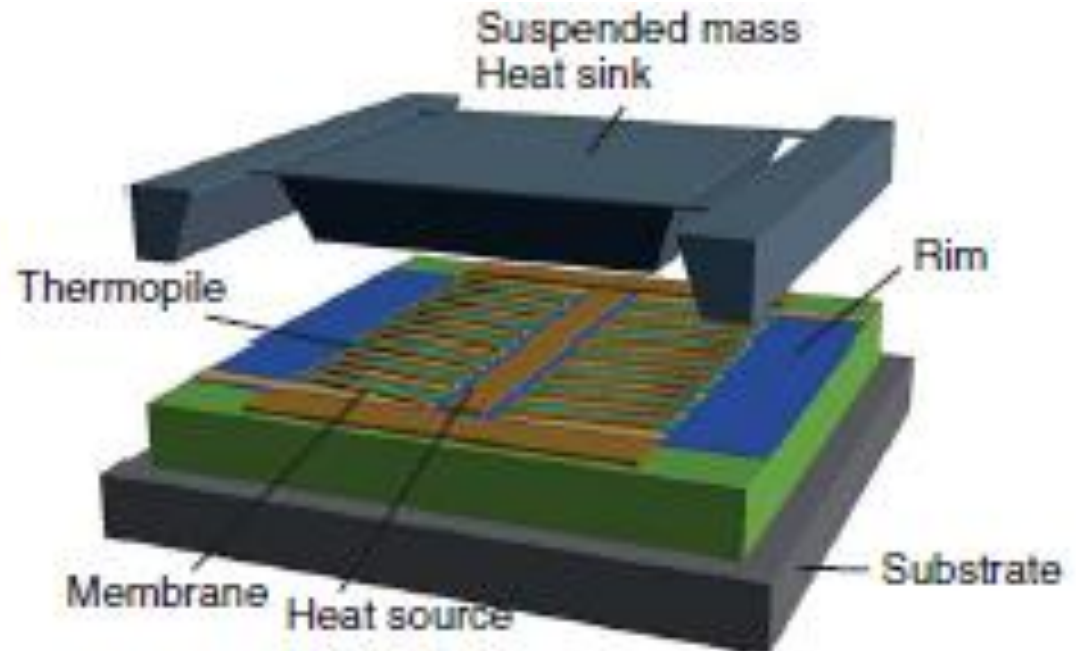
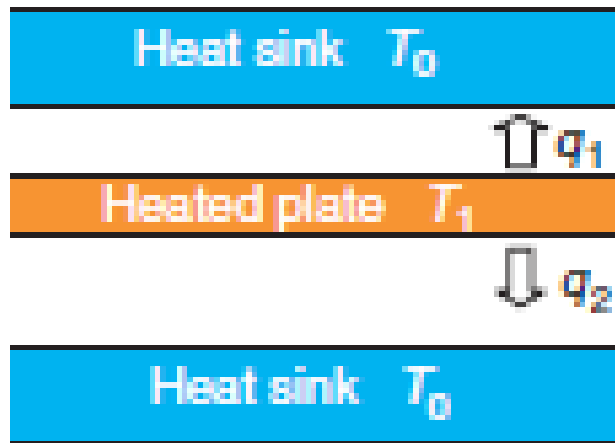


$$\Delta C_{TOT} = (C1+C4) - (C2+C3)$$



$$\Delta C_{TOT} = (C1+C2+C3+C4) - 4C_{rest}$$

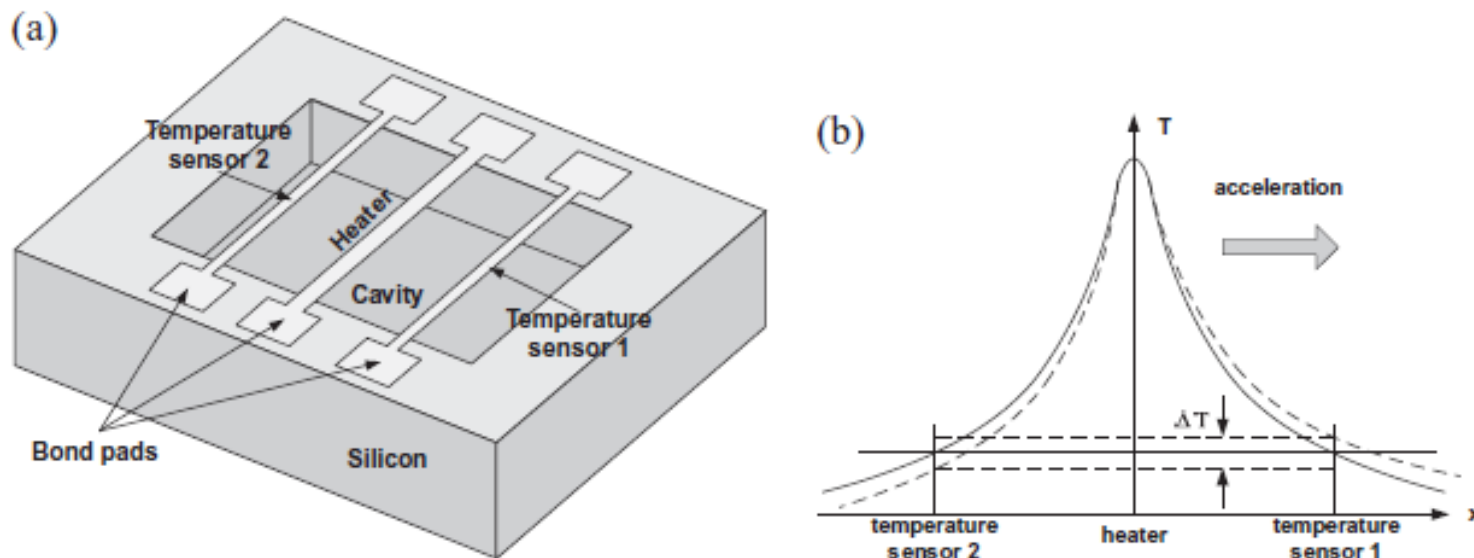
5. Термокондуктивен MEMC акселерометър



Разстоянието между плочите е по-малко от 1 μm и конфекцията може да се пренебрегне

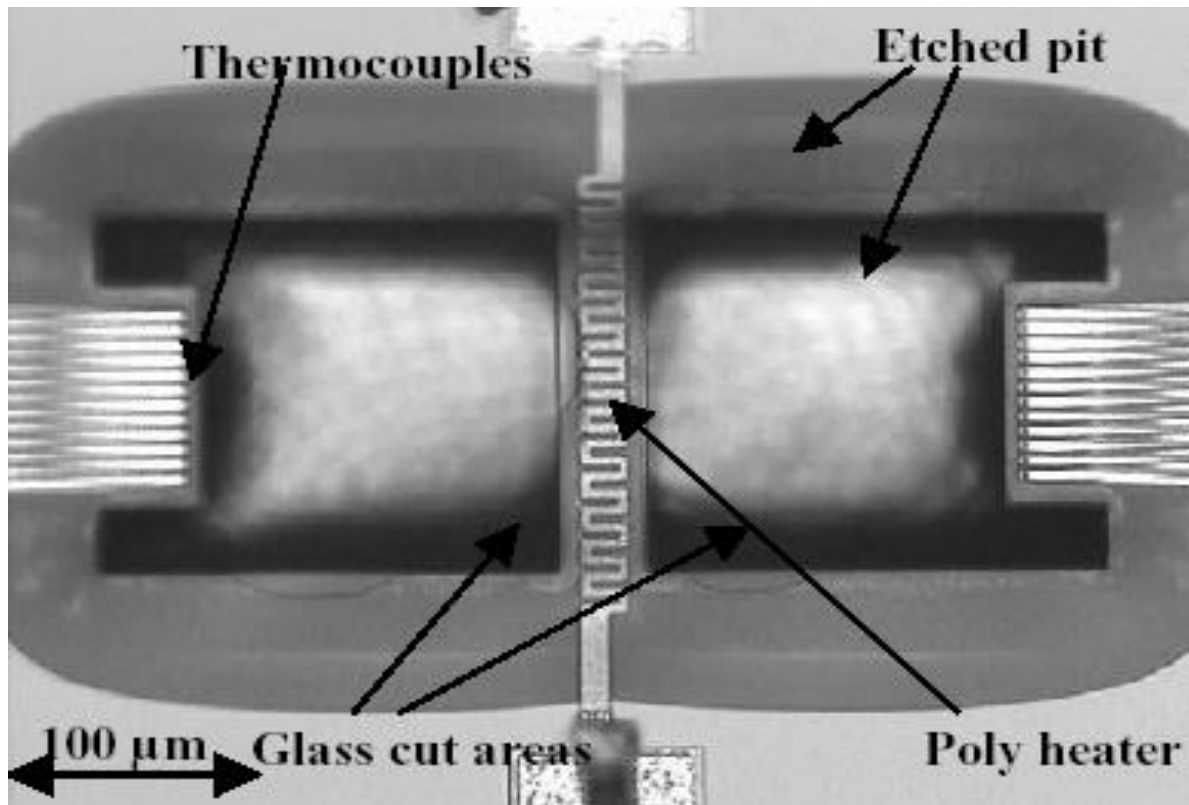
The polysilicon–aluminum thermocouples have a relatively large Seebeck coefficient of about $0.2\text{--}0.4\text{mVK}^{-1}$. The tested sensitivity of the accelerometer is 20mVg_1 . The accelerometer works at frequencies up to 300 Hz and has a temperature coefficient of $0.12\% \text{K}^{-1}$. [18].

6. Термоконвективен MEMC акселерометър

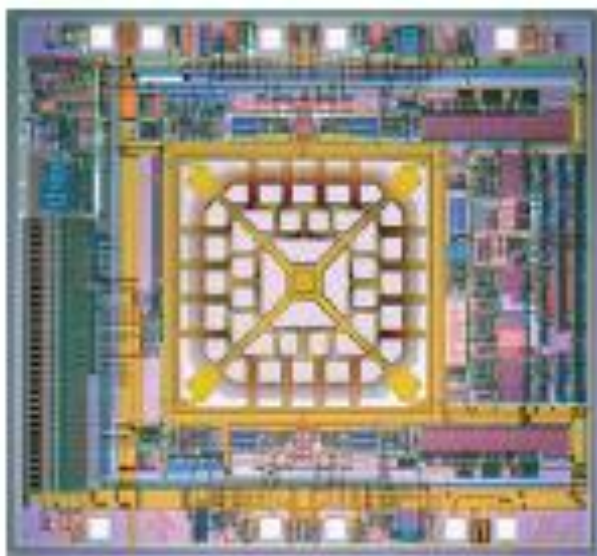


Фиг. 8 Термоконвективен MEMC акселерометър (a) конструкция; (b) разпределение на температурата по x без (плътна линия) и с ускорение (пунктирна линия) [10].

При този вид акселерометри роля на инерционна маса играе газ в микрокухина. В средата на кухината е разположен нагревател (Heater), а от двете му страни симетрично са разположени термосензори (Temperature sensor). При липса на ускорение двата термосензора имат равни показания. При поява на ускорение газът се измества в посока обратно на ускорението и това предизвиква изместване на температурното разпределение. Големината на ускорението се отчита по разликата в показанията на двата температурни сензора.

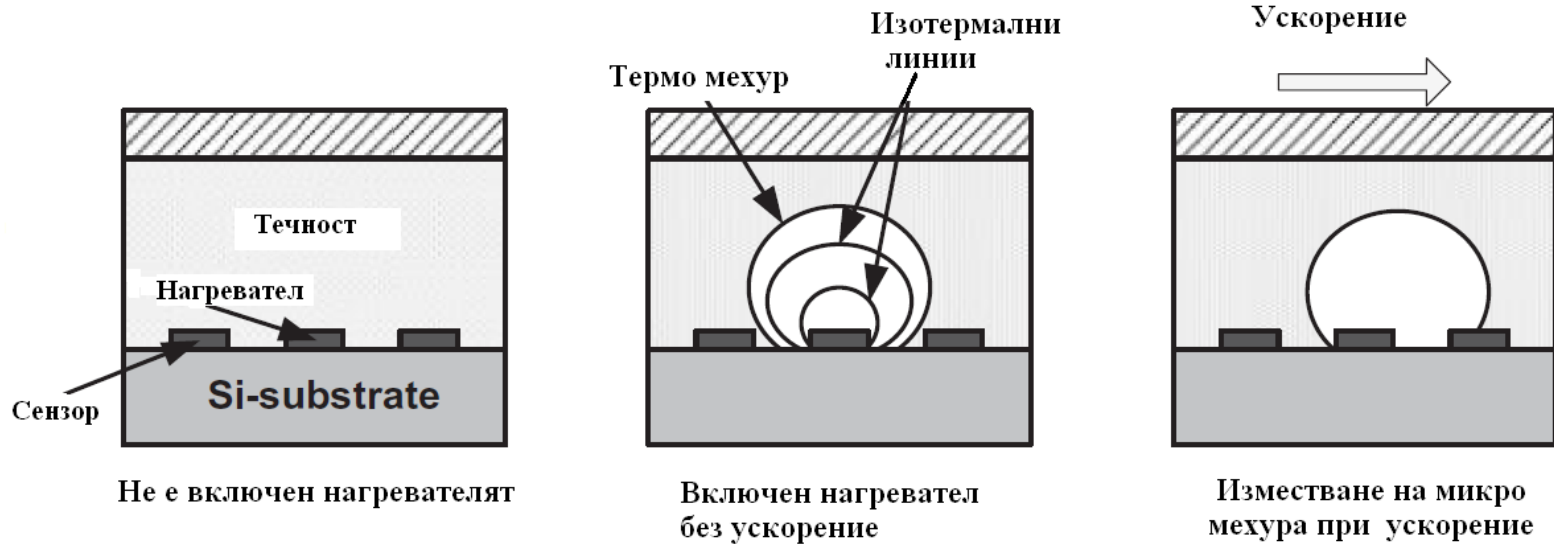


SEM изображение на температурен акселерометър, базиран на конвективен поток от газ [21].



Фиг. 8 Двусов термоконвективен MEMC акселерометър (a) поглед отгоре; (b) форма на термосензора [19].

7. Термомехурни акселерометри

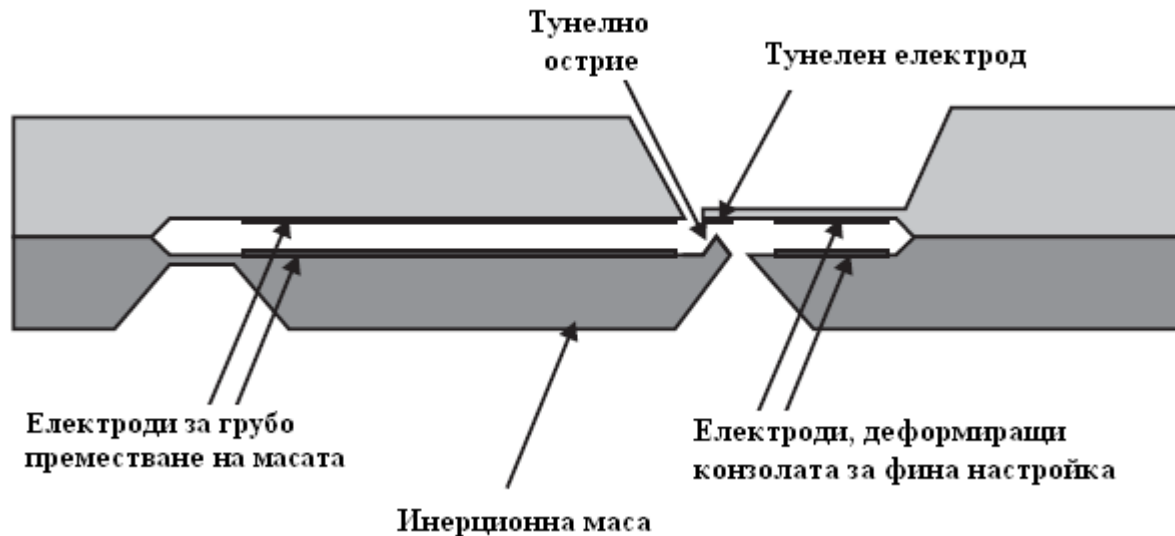


Фиг. 10 Принцип на действие на термомехурен акселерометър [10].

8. Резонансни акселерометри

Резонансните сензори използват изменение на резонансни честоти, фази или резонансни амплитуди на механични преобразуватели, причинени от ускорения. Честотно модулираните акселерометри имат висока чувствителност и широк динамичен диапазон. Честотният изход лесно се преобразува в цифров с високо отношение сигнал-шум като се използва оптимална честотна демодулация [10].

6. Тунелен акселерометър



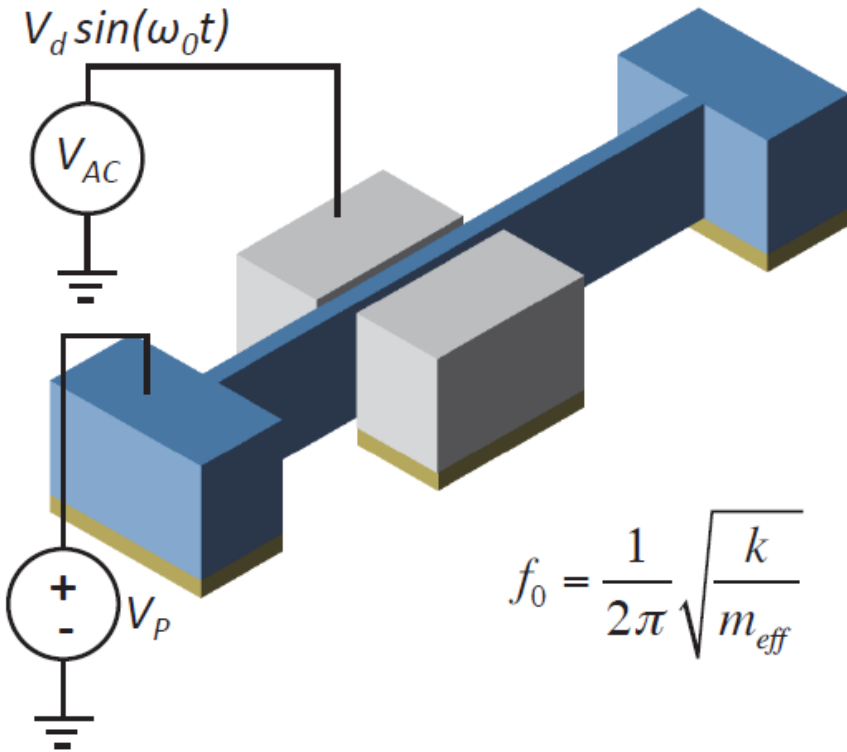
Фиг. 9 Структура на тунелен акселерометър [8].

Тунелният ток между острие и електрод е експоненциална функция на разстоянието между тях и може да се използва за измерване на позицията на инерционната маса. Тунелният ток се пресмята с формулата

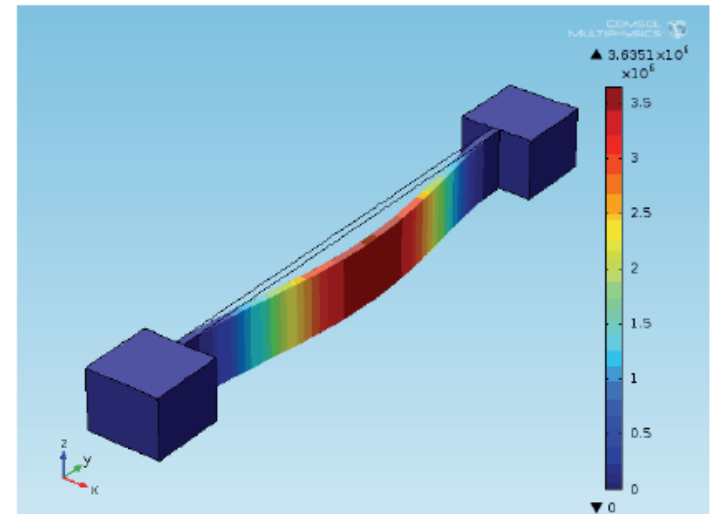
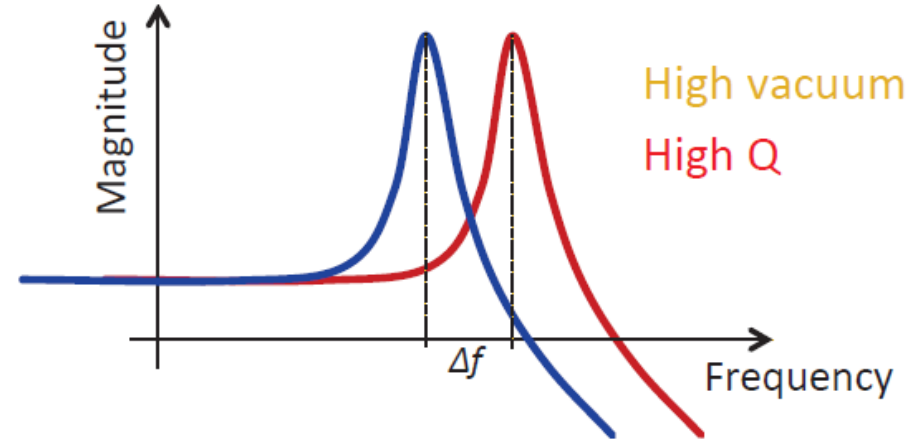
$$I = I_0 \exp(-\beta\sqrt{\phi z})$$

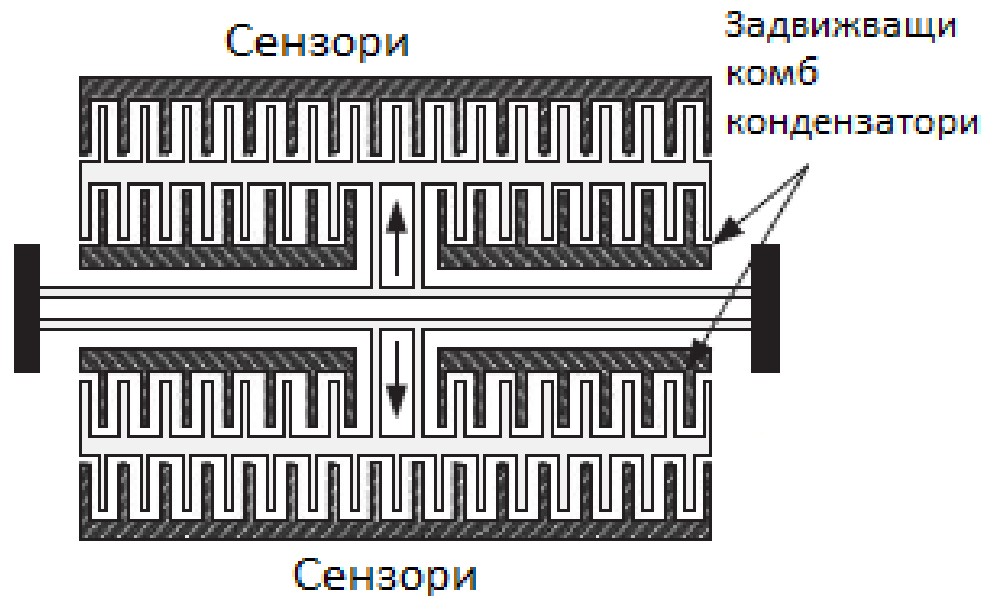
където I_0 е мащабирания ток зависещ от материала и формата на острието (типичната стойност е $1.4 \cdot 10^{-6} \text{ A}$), β е коефициент на преобразуване с типична стойност $10.25 \text{ eV}^{-1/2} \text{ nm}^{-1}$, ϕ е тунелна бариерна височина с типична стойност 0.5 eV , и z е разстоянието между електрода и острието [8].

MEMS Резонатор



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}}$$

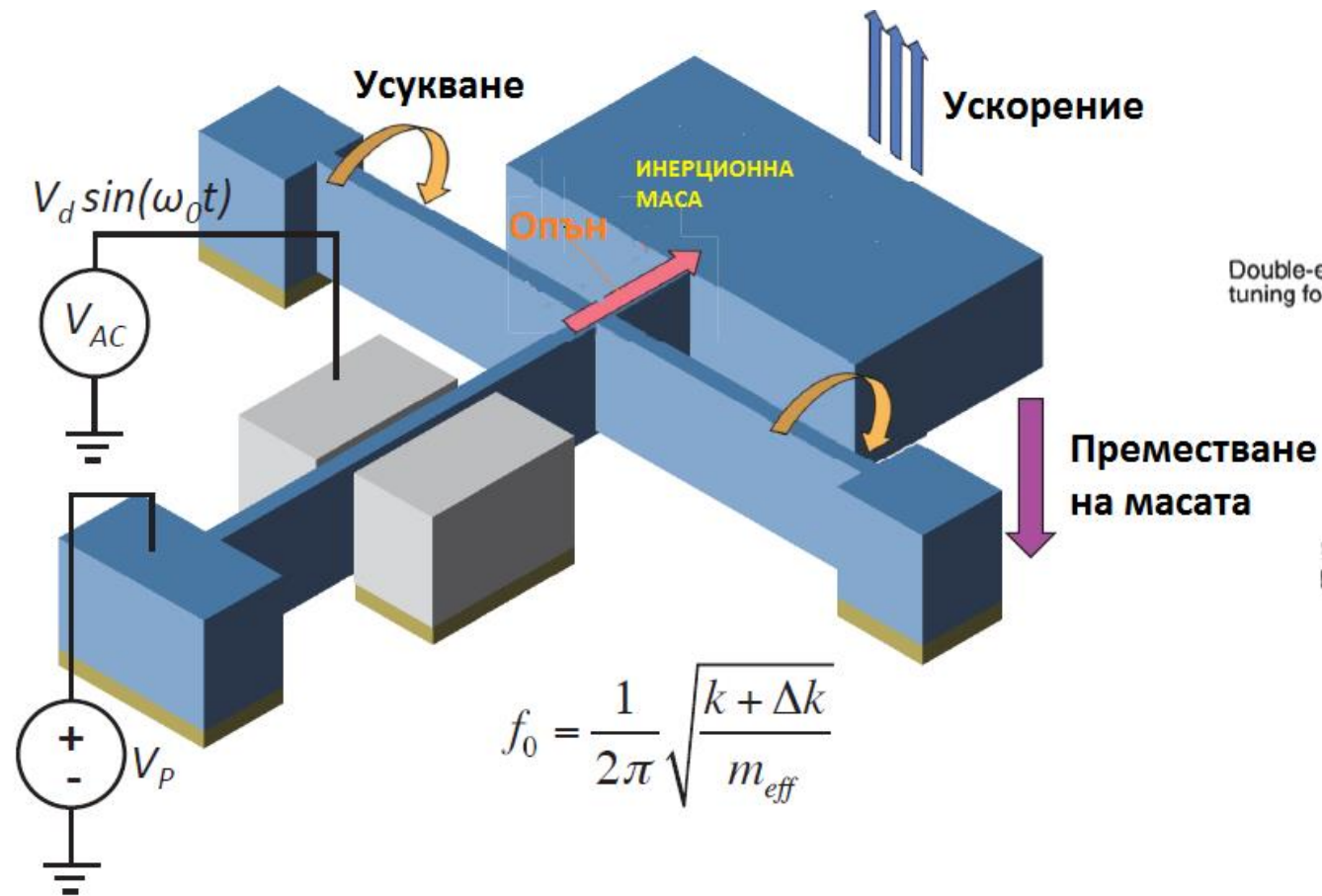




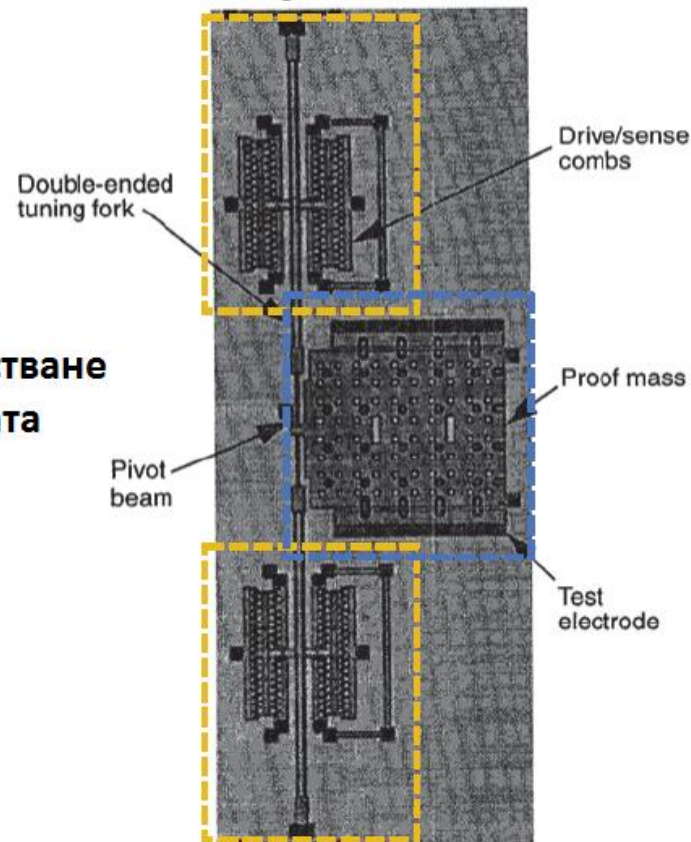
Фиг. 11. Двойно запънат камертон (double-ended tuning fork - DETF) [10].

Двете греди се възбуждат да трептят противофазно чрез гребеновидните (comb) кондензатори. Чрез външните гребеновидни кондензатори се измерва резонансната честота, която се променя подобно на струна на музикален инструмент.

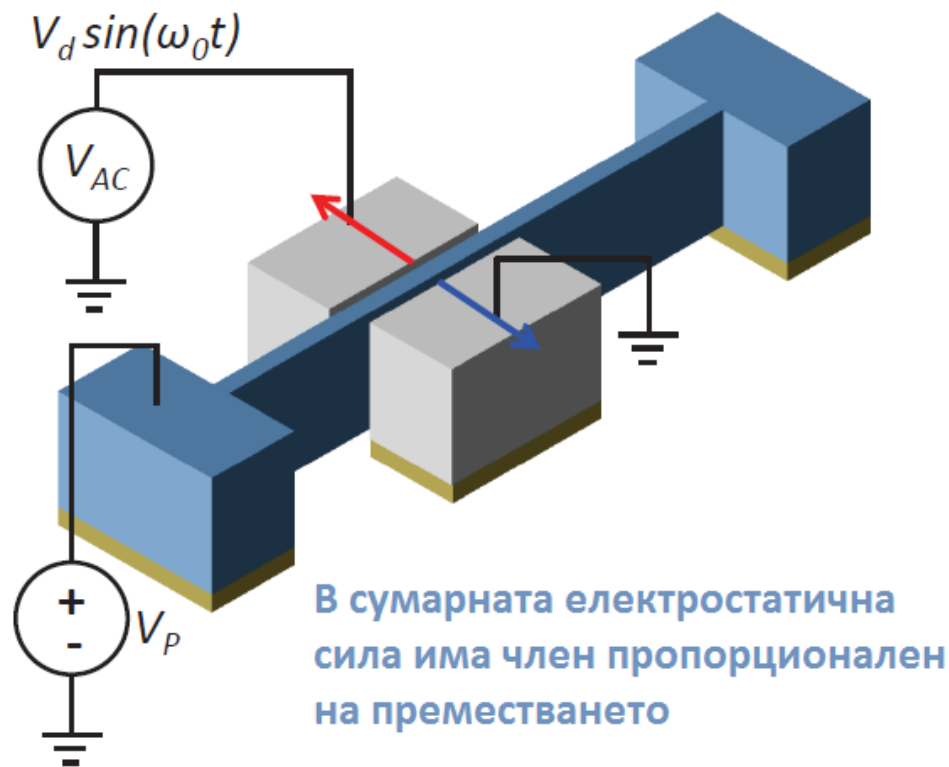
Масов резонансен акселерометър



T.A Roessing et al, Transducers, 1997



Резонатор с настройващ се коефициент на еластичност



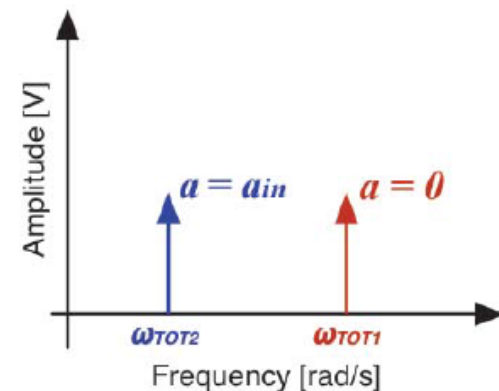
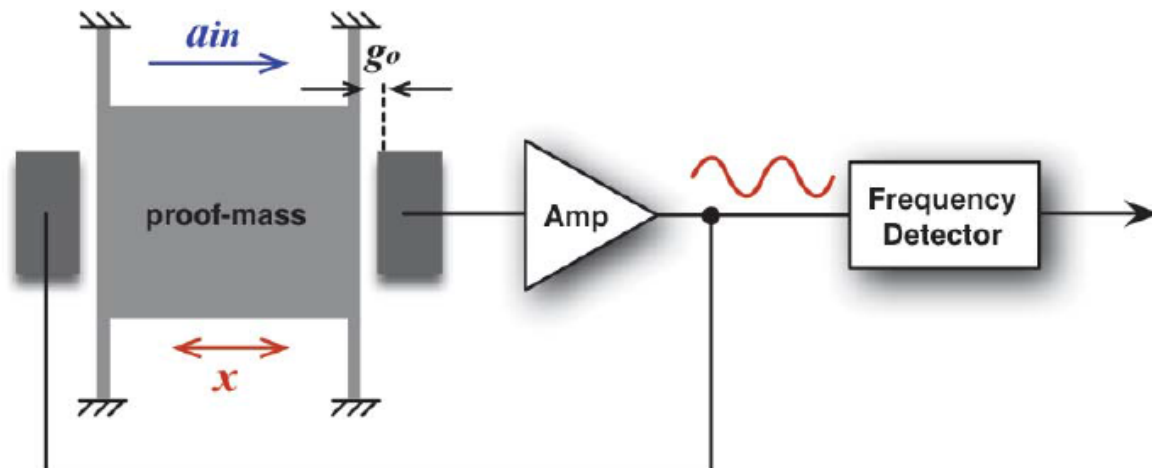
$$F_{elec} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} V^2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon A}{(g_0 \mp x)^2} V^2$$

$$F_{elec} \approx \frac{1}{2} \frac{\varepsilon A}{g_0} V^2 \cdot \left(\frac{1}{g_0} \pm \frac{2}{g_0^2} x + \frac{3}{g_0^3} x^2 \pm \dots \right)$$

$$F_{elecTOT} = F_{elec1} - F_{elec2}$$

$$F_{elecTOT} \approx \frac{\varepsilon A}{g_0} \cdot \left(V_{AC} \cdot V_P + \frac{2 \cdot V_P^2}{g_0^2} x \right)$$

Резонансен акселерометър с настройващ се коефициент на еластичност



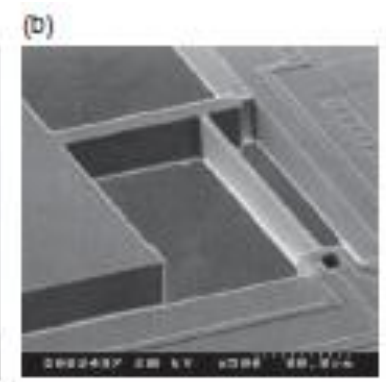
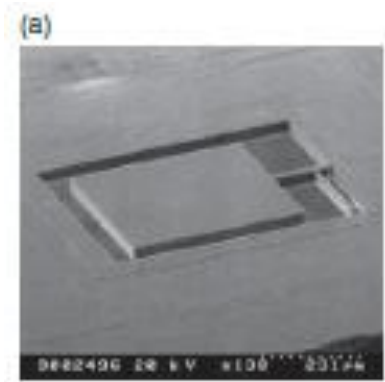
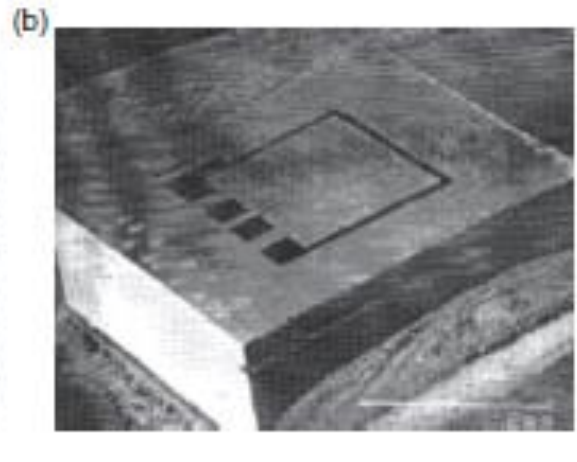
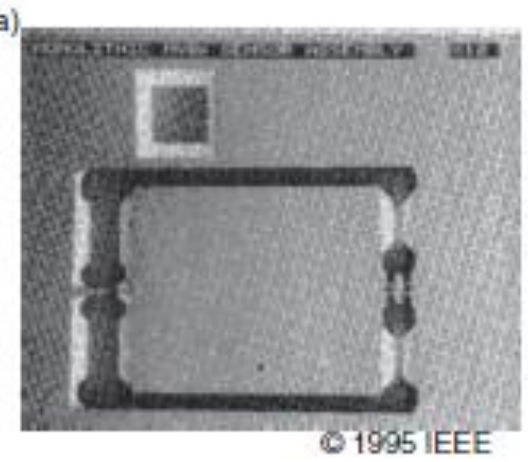
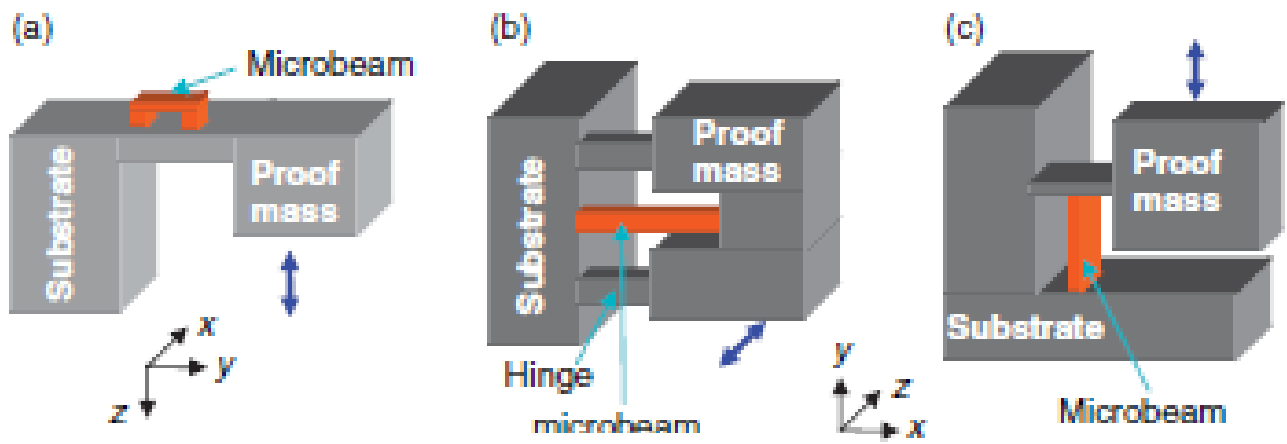
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k x = m a_{in} + F_{elecTOT}$$

Механична трансферна функция
Входно ускорение
Електростатична сила

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + \left(k - \frac{2 \varepsilon A}{g^3} V_P^2 \right) x = m a_{in} + \frac{\varepsilon A}{g^2} V_{ac} V_P$$

$$\omega_{TOT} = \sqrt{\frac{k - 2 \frac{\varepsilon A}{g^3} V_P^2}{m}}$$

$$\frac{\partial \omega_{TOT}}{\partial a_{in}} \approx -\frac{3}{2} \frac{\varepsilon A}{k \omega_0 g^4} V_{DC}^2$$



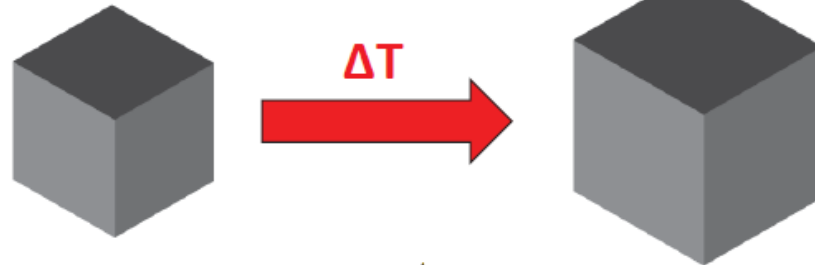
Честотни акселерометри с вибриращи микрореди с променливо нормално напрежение [19].

Challenges in Resonant Accelerometers

- Temperature coefficient of frequency (*TCF*)
 - Dimensional change \rightarrow *CTE* or α (~ 2.6 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ in silicon)
 - Material properties \rightarrow *TCE* (~ -32 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ in silicon)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{eff}}}} \propto \frac{w}{\sqrt{\rho \cdot l^2}} \quad w = w_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad \rho = \rho_0(1 - 3\alpha \cdot \Delta T)$$

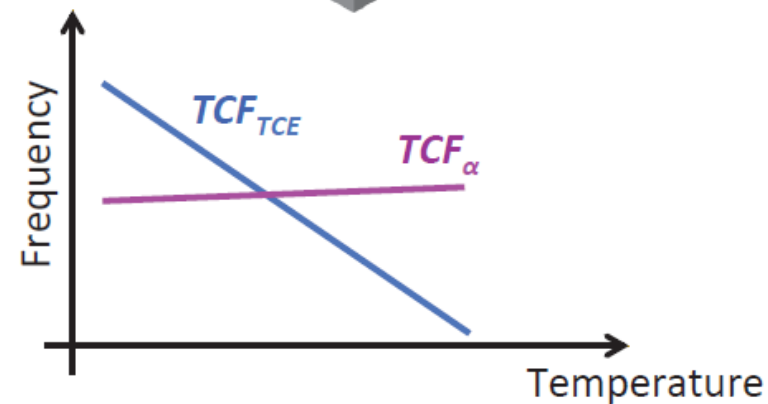
$$TCF_{\alpha} = \frac{1}{f_0} \frac{df}{dT} \approx \frac{\alpha}{2}$$



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{eff}}}} \propto \sqrt{E} \quad E = E_0(1 + TCE \cdot \Delta T)$$

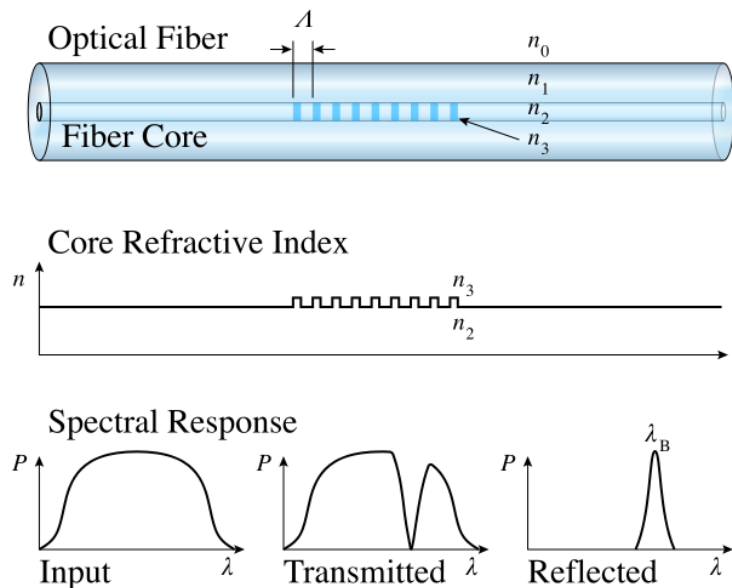
$$TCF_{TCE} = \frac{1}{f_0} \frac{df}{dT} \approx \frac{TCE}{2}$$

TCF ≈ -30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
SF $\approx 500-1500$ ppm/g



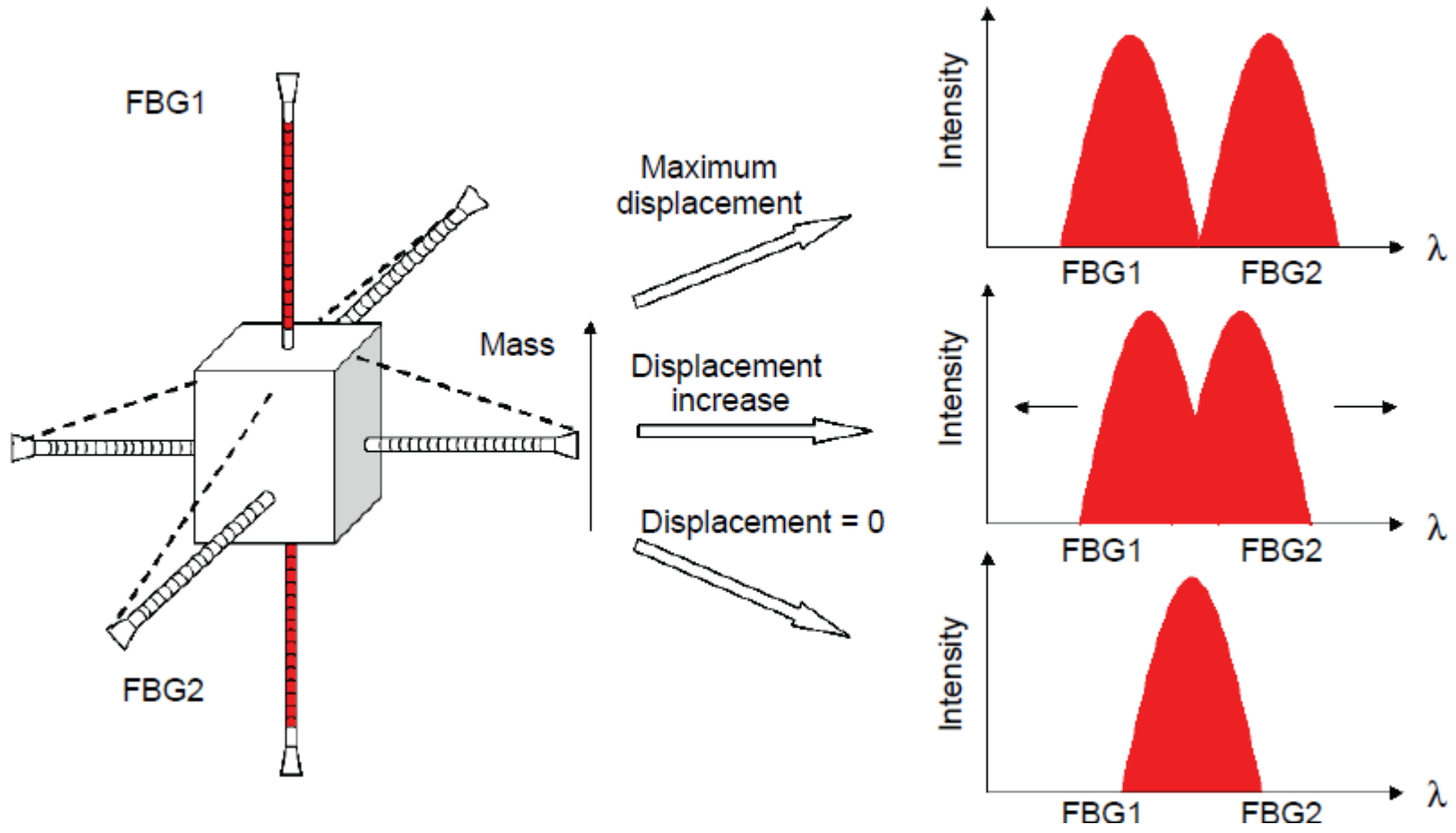
- Error in silicon resonant accelerometers: 20 – 60 mg/ $^{\circ}\text{C}$ [16]

9. Оптични акселерометри



Фиг. 12. Fiber Bragg Grating структура, с индекс на рефракция профил и спектрални характеристики [11].

Сензорът от типа влакно с решетка на Брак (fiber Bragg grating FBG) е вид разпределен Bragg рефлектор конструиран върху къс сегмент от оптично влакно, което отразява определена дължина на вълната на светлината и пропуска всички останали. Това се постига чрез създаване на периодична вариация на рефрактивния индекс на сърцевината на влакното, което генерира специфично за дължината на вълната диелектрично огледало. FBG може да се използва като оптичен филтър, за да блокира дадени дължини на вълни, или като специфичен рефлектор за дадена дължина на вълната.



Фиг. 13. FBG 3D акселерометър [12].

10. Пиезорезистивни акселерометри

Пиезорезистивните микро-акселерометри с хибридна електроника са на пазара от 1980 г.

Основни производители са SensoNor, Denso, Hitachi, Motorola, Danfoss и др. Тези акселерометри показват много добри качества в автомобилната промишленост и авиацията.

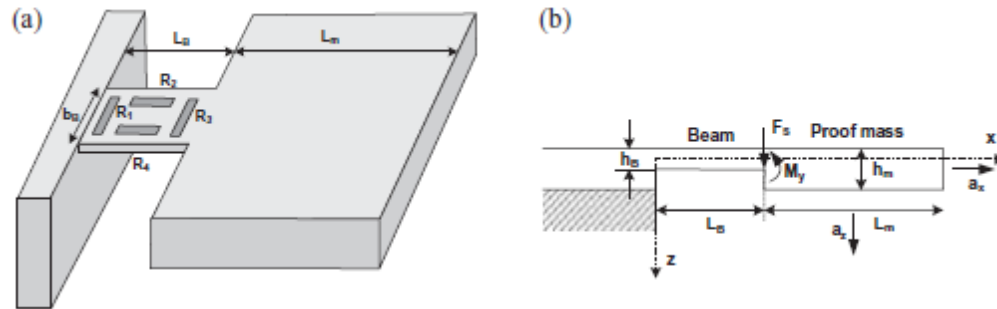
Основен недостатък е необходимостта от продължително калибриране и температурна компенсация на отместването и чувствителността, защото пиезорезисторите променят стойностите на съпротивленията си (и токовете от утечки при дифузионните съпротивления) повече от един порядък между стойности от -20 до $+140^{\circ}\text{C}$.

Друг недостатък е липсата на интегрирани самотестващи се за критични случаи системи.

В пиезорезистивните акселерометри фактически няма собствено задвижване за детектиране, което изисква допълнителни подходящи актуатори, например електростатични, електротермични или пиезоелектрични, които да въздействат на инерционната маса.

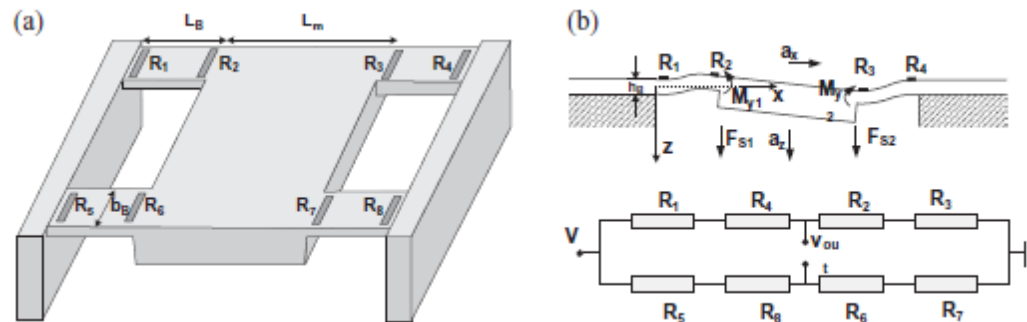
Тези допълнителни усилия и разходи за самотестване в критични приложения може да се окажат сериозен недостатък на пиезорезистивните акселерометри.

10. Пиезорезистивни акселерометри



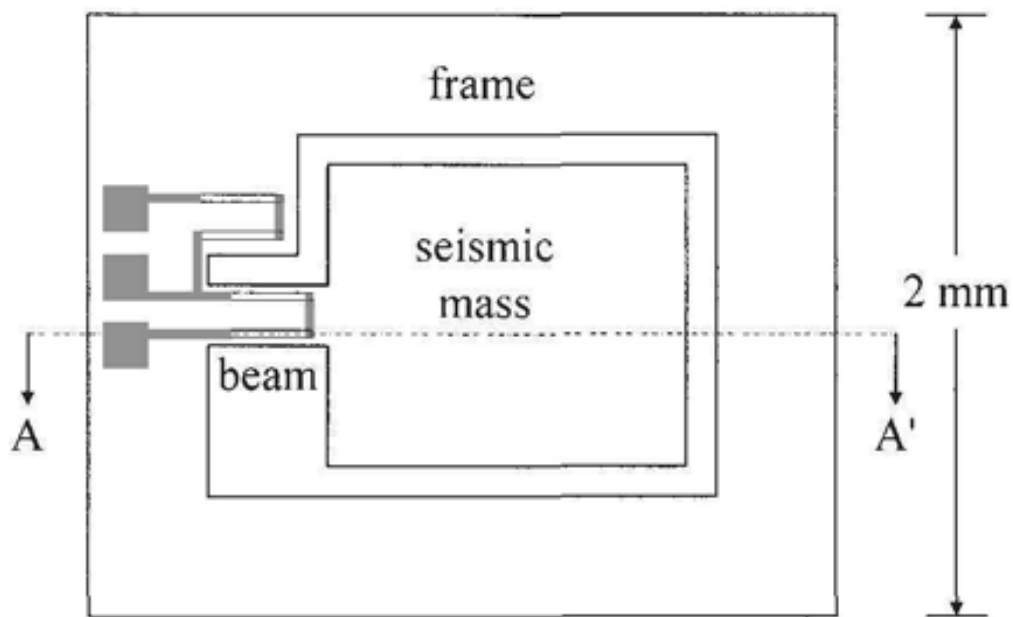
Фиг. 14. 1D пиезорезистивен акселерометър [10].

Пиезорезистивният ефект при тези акселерометри се използва за определяне на напрежението в еластичното окачване на сеизмичната маса.

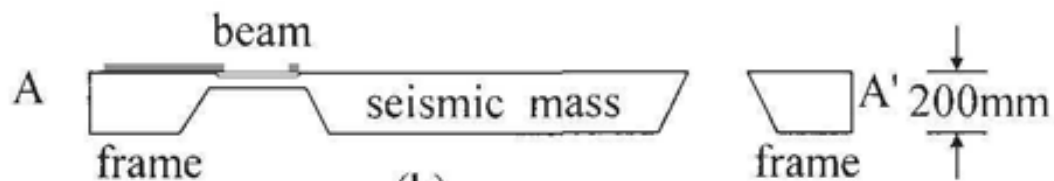


Фиг. 14. 3D пиезорезистивен акселерометър [10].

Схема на първия пиезорезистивен акселерометър



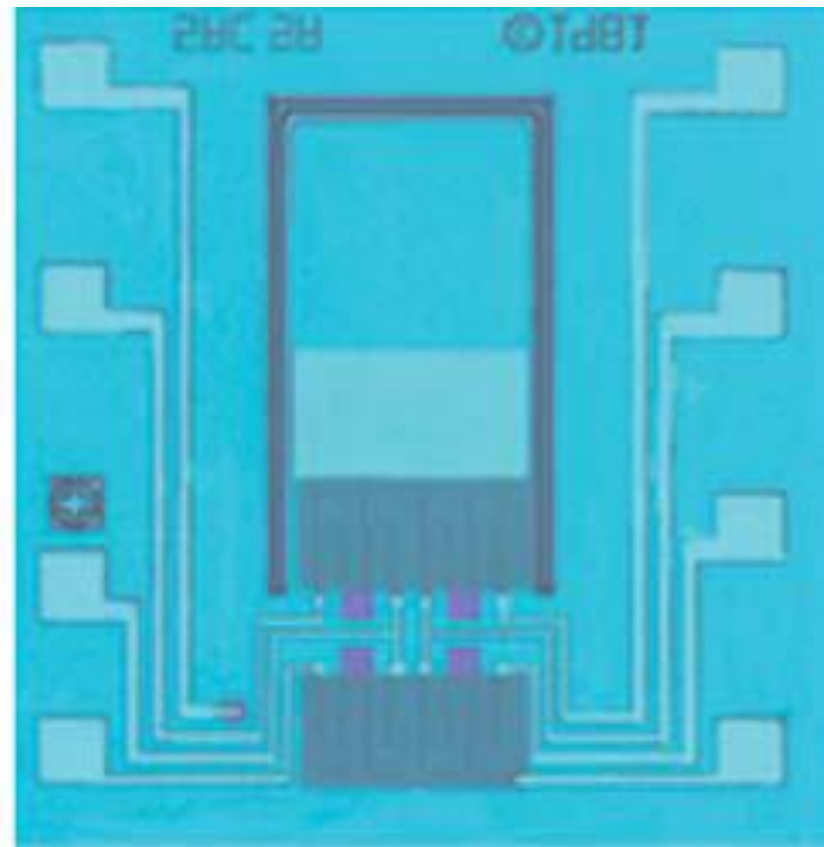
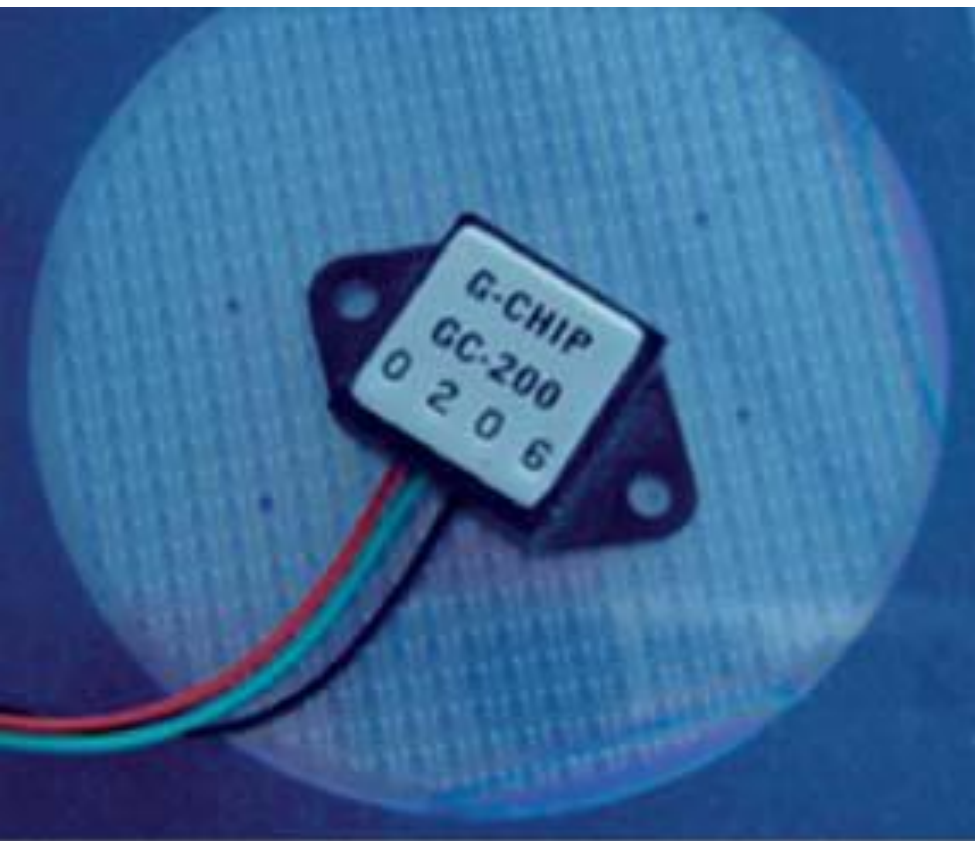
(a)



(b)

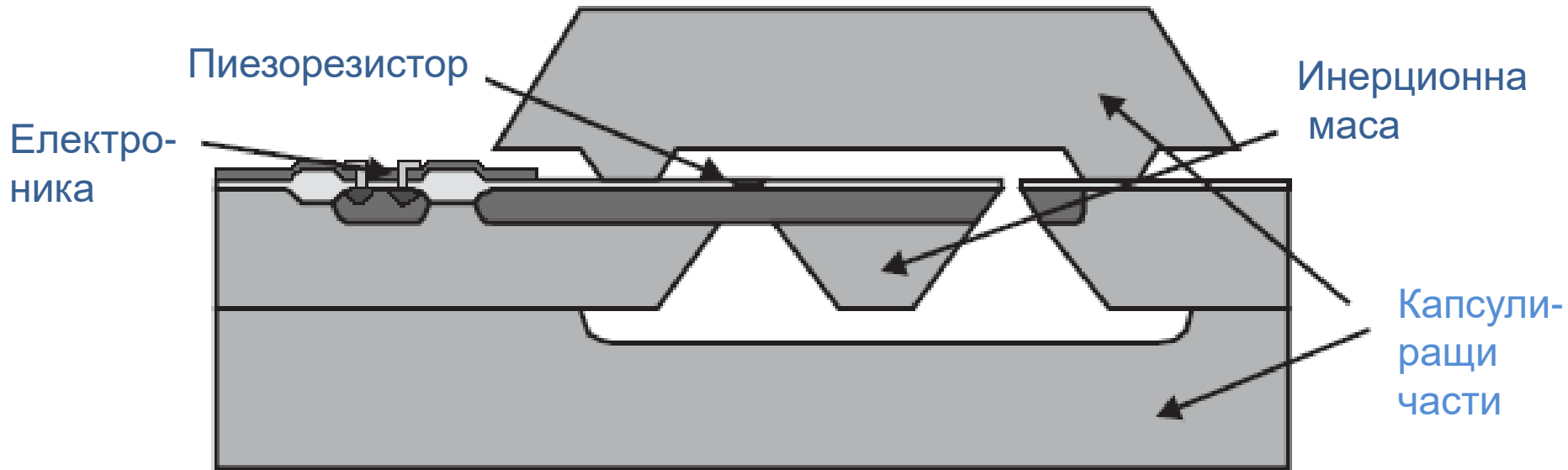
Чипът на акселерометъра се състои от рамка сеизмична маса и тънка греда. Двата резистора са изработени чрез селективна дифузия върху чипа, един върху гредата и другият върху рамката и са свързани чрез метални пътечки, за да образуват полумост.

(a) поглед отгоре; (b) разрез на чипа



In south Microsystems, Auburn, AL, 1979, използват алуминиево метализиране и цял пиезорезистивен мост. Акселерометърът е известен като G-чип.

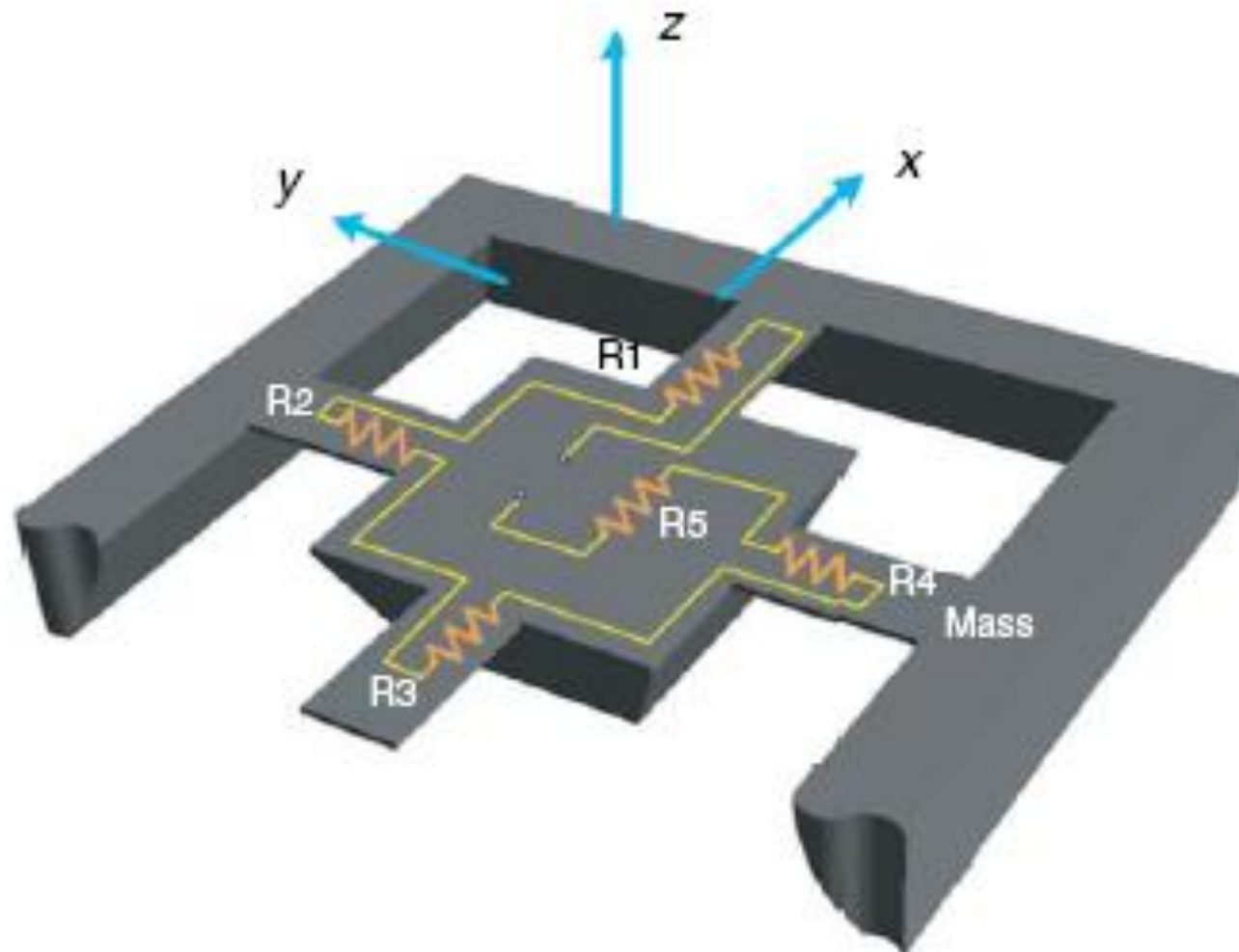
Напречно сечение на пиезорезистивен акселерометър



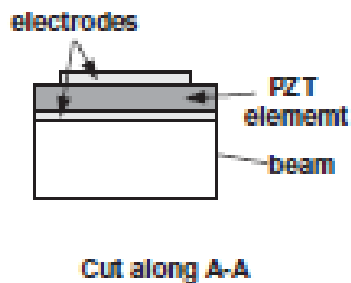
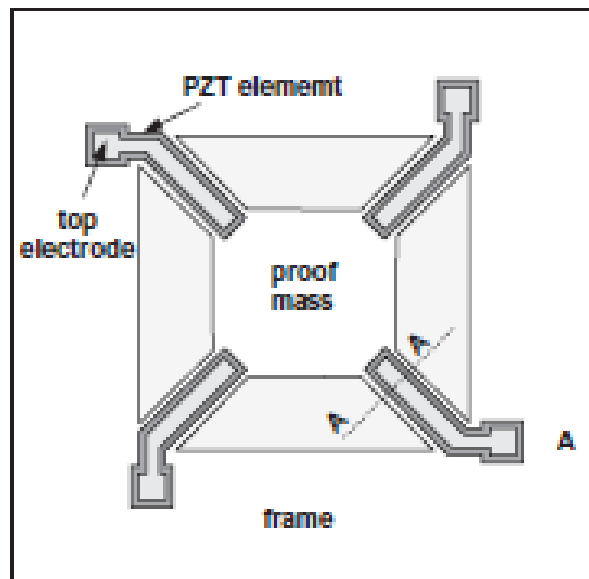
Акселерометърът е пример за приложение на обемна микрообработка.

Триосен пиезорезистивен акселерометър

При ускорение по ос x , $R1$ и $R3$ променят стойностите си противоположно, докато $R2$ и $R4$ се изменят с еднакви стойности и знак. Така ускорението по ос x може да бъде установено чрез разликата на $R1$ и $R3$. ($R5$) се използва за елиминиране на термичните отклонения. Сумата от всички четири пиезорезистори дава ускорението по ос z .



11. Пиезоелектрични акселерометри

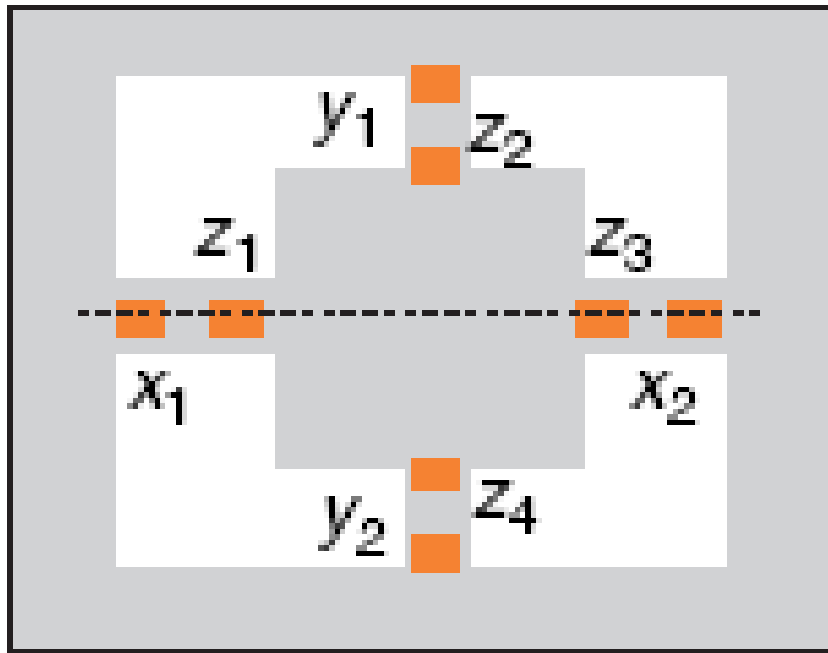


Пиезоелектричният ефект също както пиезорезистивния се използва за измерване на напрежението или деформацията в еластичното окачване на инерционната маса. При този вид сензори се генерира напрежение при деформация на пиезоелектричния материал, докато при пиезорезистивните при деформацията се променя електрическото съпротивление на материала.

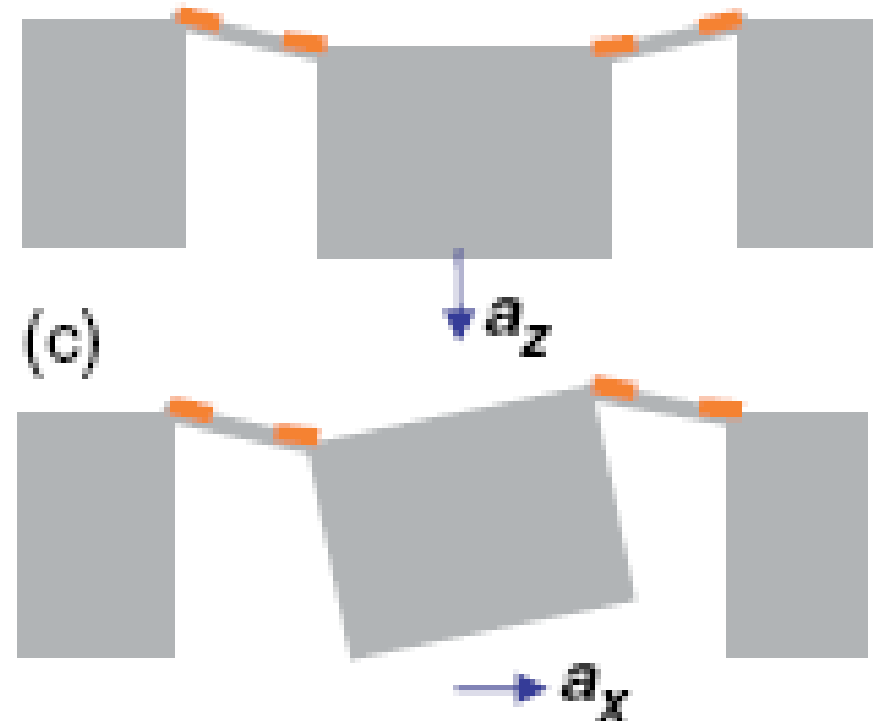
Фиг. 16. Пиезоелектричен акселерометър с 4 греди (quad-beam) [10].

Схема на триосов пиезоелектричен акселерометър с една инерционна маса

(a) Изглед отгоре (x-y)



Напречен разрез



Инерционната маса е закрепена в центъра чрез 4 симетрични греди. Когато има ускорение по ос z , инерционната маса опъва горните слоеве на биморфните греди (т.е., x_1 , x_2 , y_1 , и y_2), и натискат z_1 - z_4 . Така **сумата от z_1 до z_4 измерва ускорение по z** . Диференциалните компоненти x_1 , x_2 и y_1 , y_2 са нули. Когато има ускорение по x инерционната маса се завърта около y , опъва x_1 и x_3 и натиска z_1 и x_2 . Освен това предизвиква срязващи напрежения в y_1 , y_2 , z_2 , и z_4 , които може да се пренебрегнат. Така **ускорението по x предизвиква сигнал от разликата на x_1 и x_2** . Разликите от y_1 и y_2 и сумите от z_1 до z_4 са нула защото напреженията в y_1 и y_2 имат еднакви амплитуди и знак, а z_1 и z_3 имат еднакви амплитуди, но противоположни знаци. За ос y се прилага съшият принцип.

Пиезоелектричните акселерометри с интегрирана електроника (IEPE) представляват голям клас от динамични сензори за вибрации, които съчетават в един защитен корпус пиезоелектричен преобразувател (PE) като механична част и интегрирана електроника, която е електрическата част.

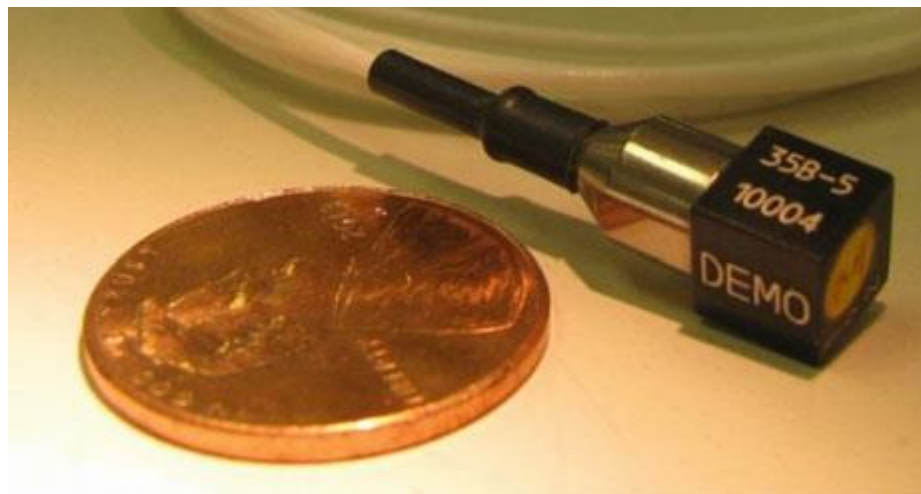
Тези сензори обикновено измерват сигнал от 1 Hz до 10 kHz, но има и такива за 0.001 Hz над 10 KHz.

Предимствата на IEPE акселерометри са:

- нисък шум;
- широка амплитудно-честотна характеристика;
- голям температурен обхват;
- нисък изходен импеданс;
- висока чувствителност;
- миниатюрен дизайн.

Приложения на IEPE акселерометри:

- самолети;
- автомобили;
- мониторинг на структури;
- медицински устройства;
- сеизмични измервания и защиты.

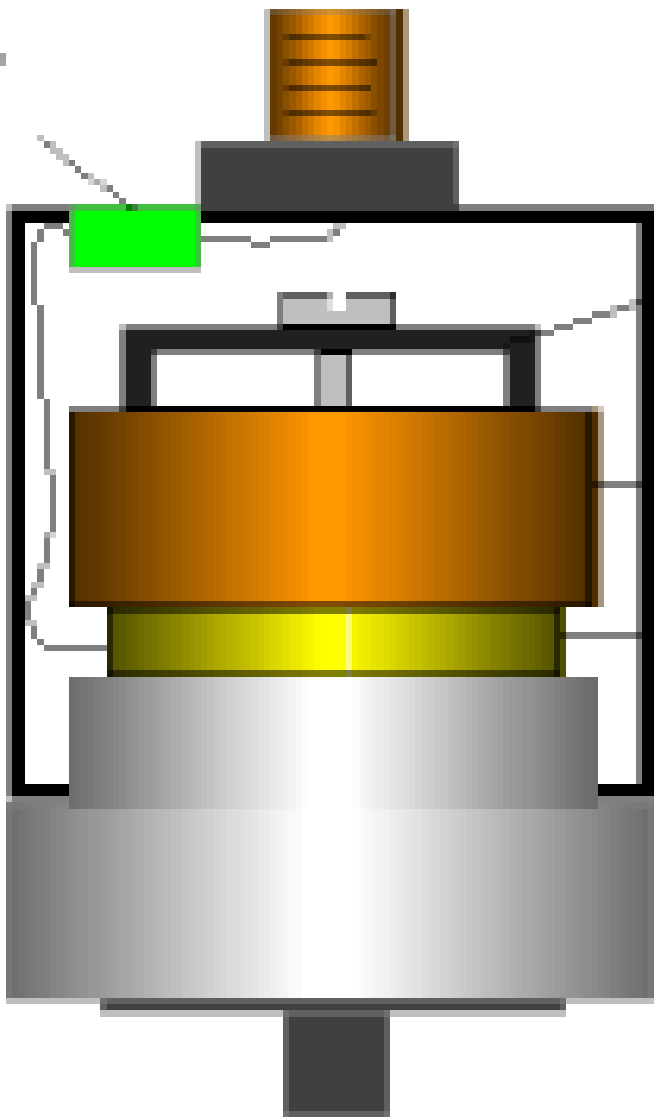


Ултра-миниатюрен (куб 6 mm, 0.55 g) IEPE 3 осев акселерометър

Акселерометри с интегрирана пиезоелектрична верига (ICP)



ICP Amplifier



Pre-loading Spring

Seismic Mass

Crystal Element

Base

Mounting Stud

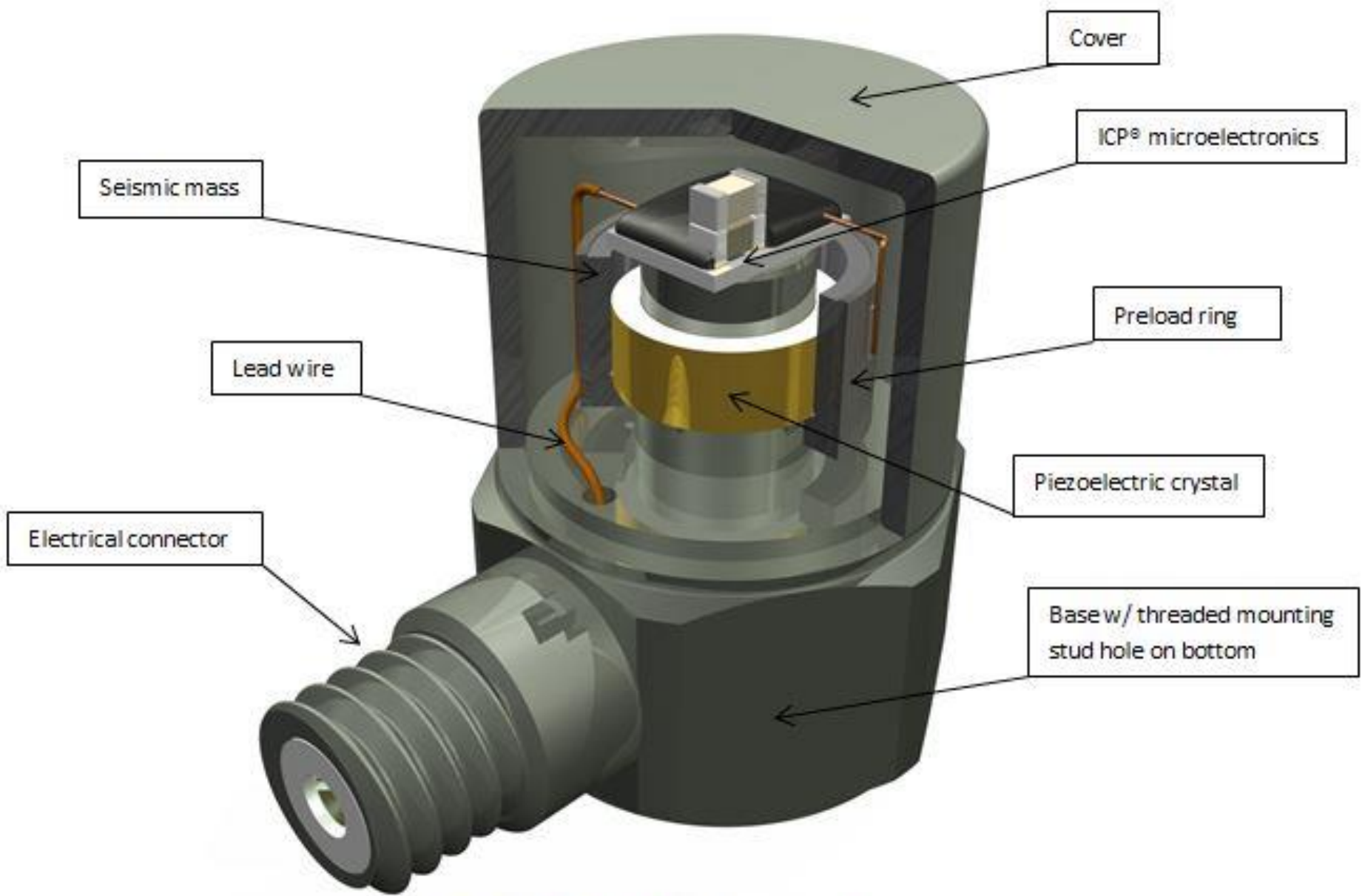
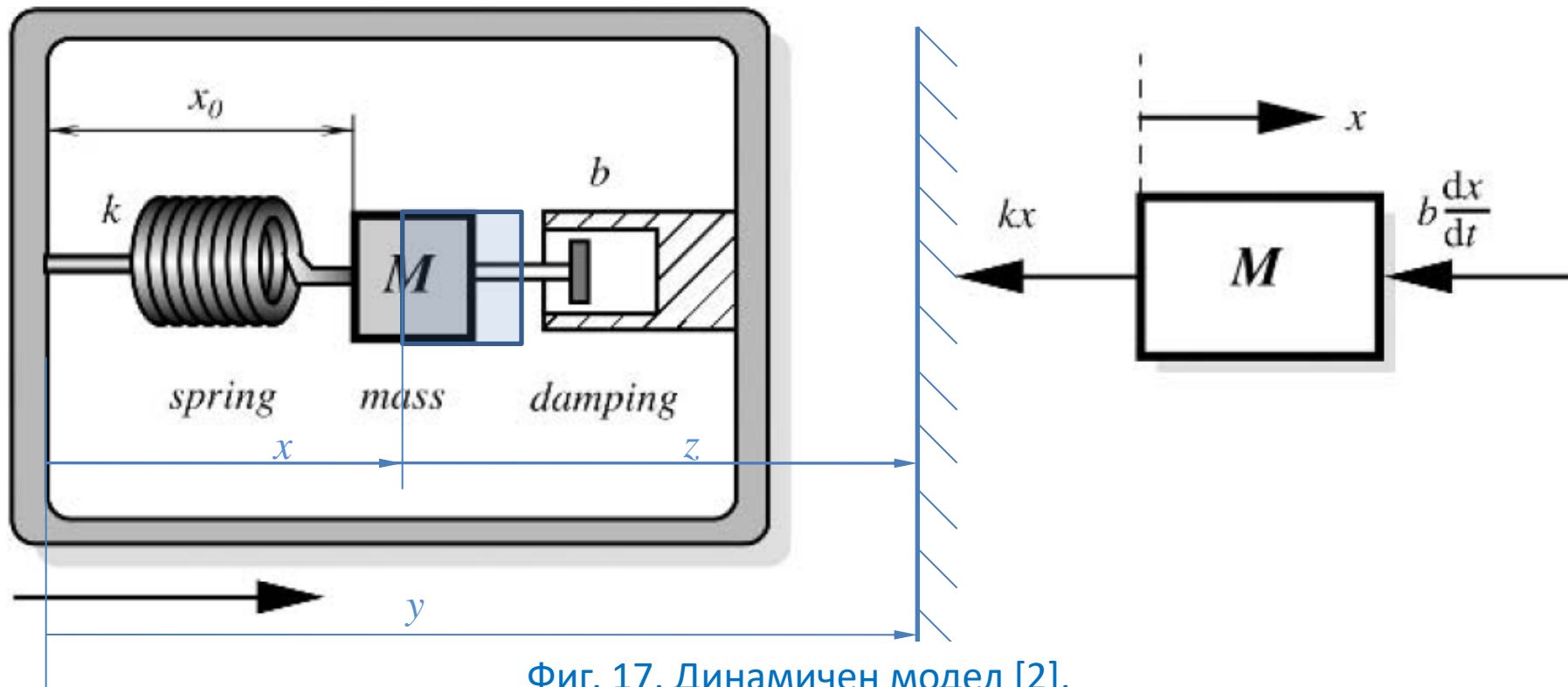


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer



Фиг. 17. Динамичен модел [2].

12. Механичен модел на акселерометър

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} = -kx - b \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Ускорението на масата спрямо земята

$\frac{d^2 y}{dt^2}$ Ускорението на корпуса на акселерометъра

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = -M \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$Ms^2 X(s) + bs X(s) + kX(s) = -MA(s)$$

$$X(s) = -\frac{MA(s)}{Ms^2 + bs + k} \quad \omega_0 = \sqrt{k/M}, \quad 2\zeta\omega_0 = b/M$$

$$X(s) = -\frac{A(s)}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad G(s) = -\frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

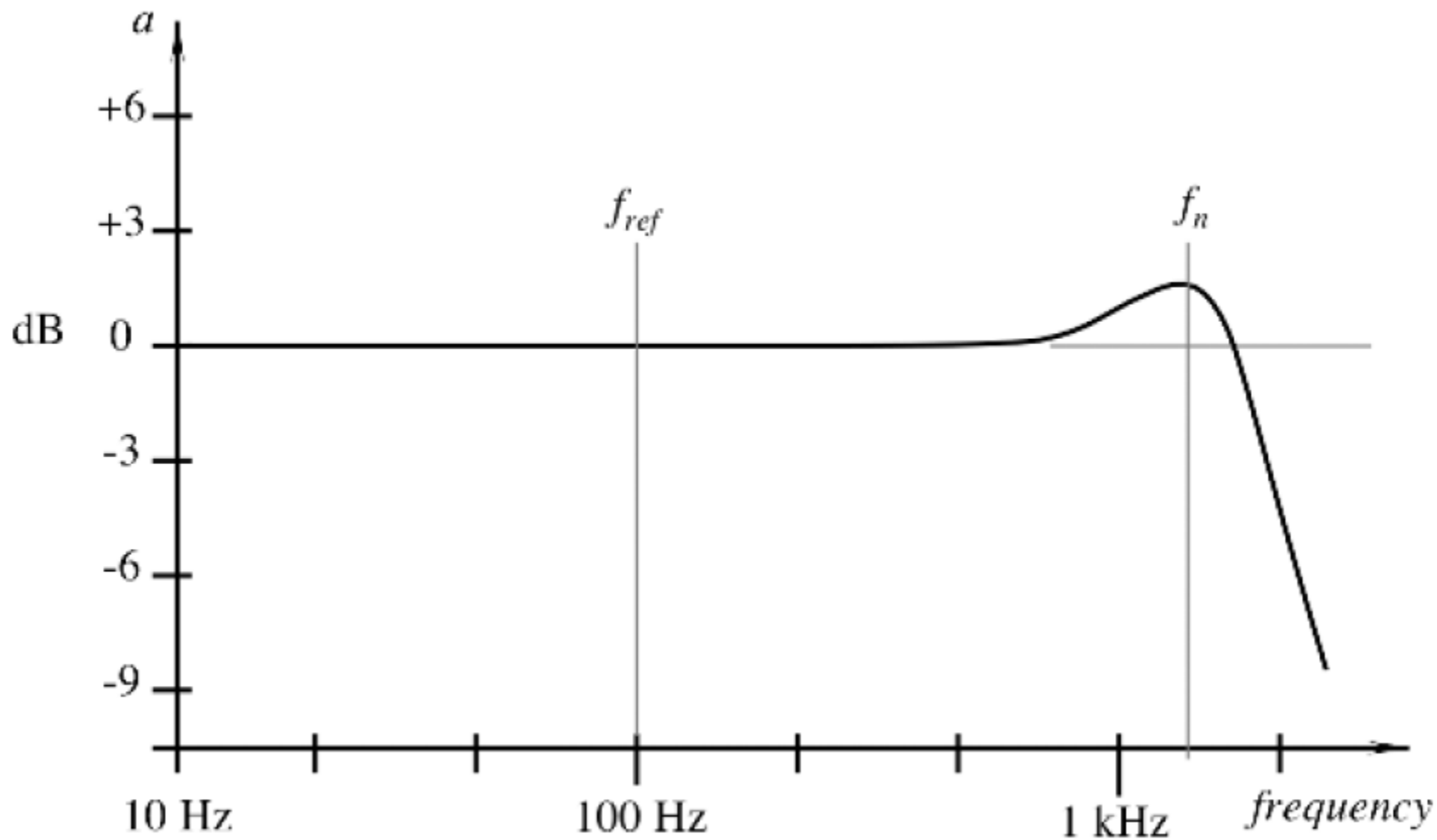
$$X(s) = G(s)A(s) \quad x(t) = L^{-1}\{G(s)A(s)\}$$

$$x(t) = \int_0^t g(t-\tau)a(\tau) d\tau \quad a \text{ — зависец от времето импулс} \quad (\zeta < 1)$$

$$\omega = \omega_0\sqrt{1-\zeta^2} \quad x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\zeta\omega_0(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) a(t) d\tau$$

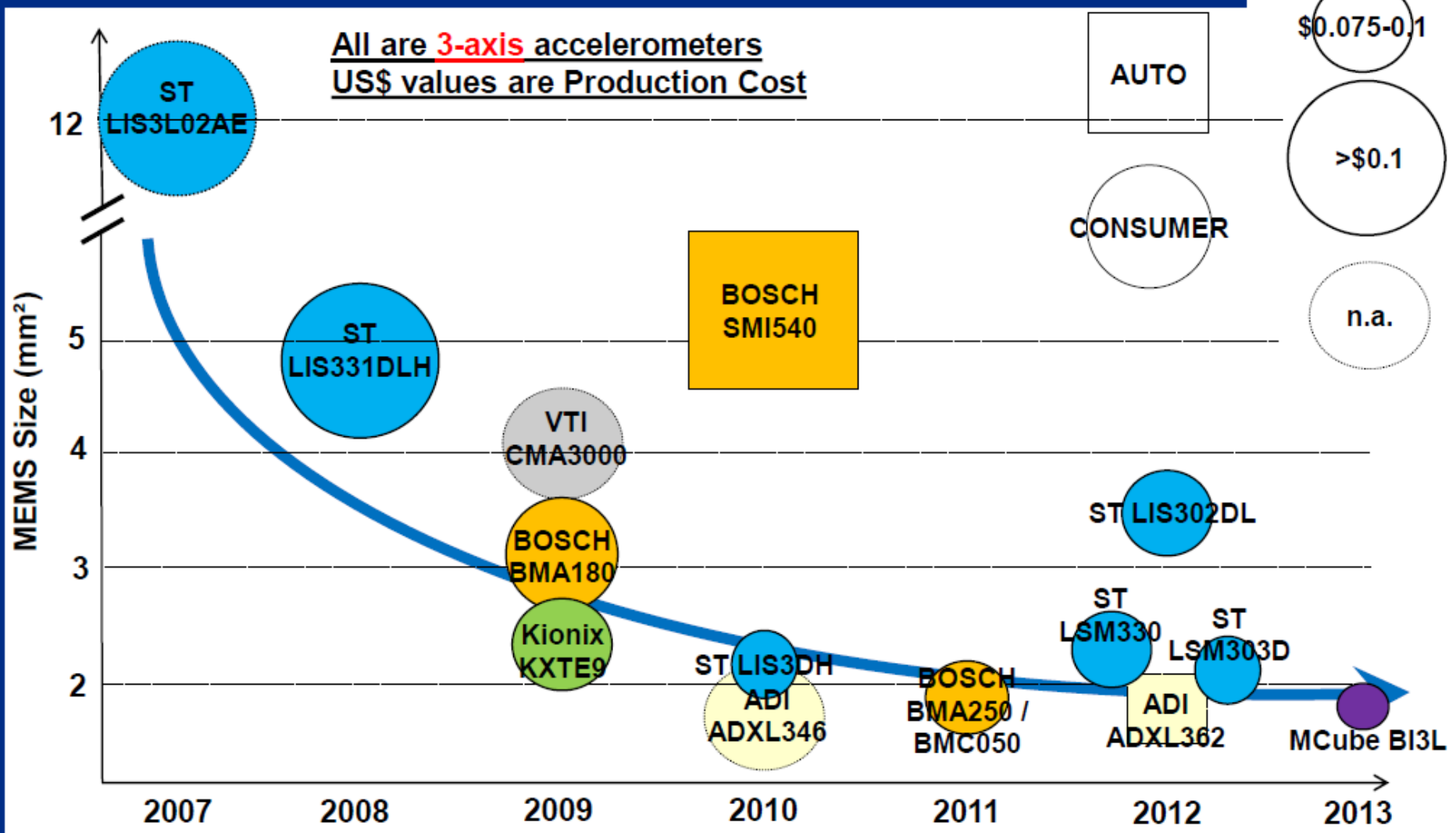
$$x(t) = \int_0^t -\frac{1}{\omega} e^{-\zeta\omega_0(t-\tau)} \sinh \omega(t-\tau) a(t) d\tau \quad (\zeta > 1)$$

$$\omega = \omega_0\sqrt{\zeta^2 - 1}$$



Фиг. 18. Амплитудно-честотна характеристика на акселерометър [2].

Accelerometer MEMS size evolution



- Package: LGA 12-pin
- Dimensions: 2.0 x 2.0 x 0.9mm
- Pin Pitch: 0.5mm
- Marking:
 - BI3L
 - IVC

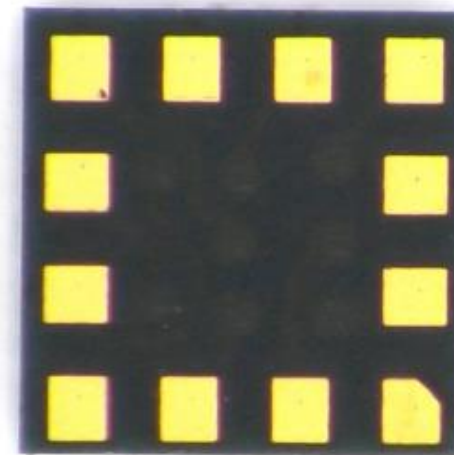


Package top view

MCube 3 Axis Accelerometer BI3L

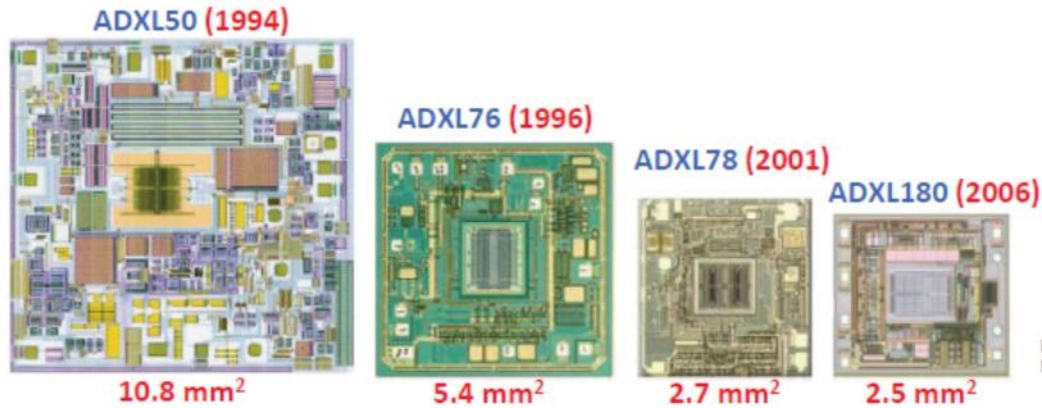


Package Side View



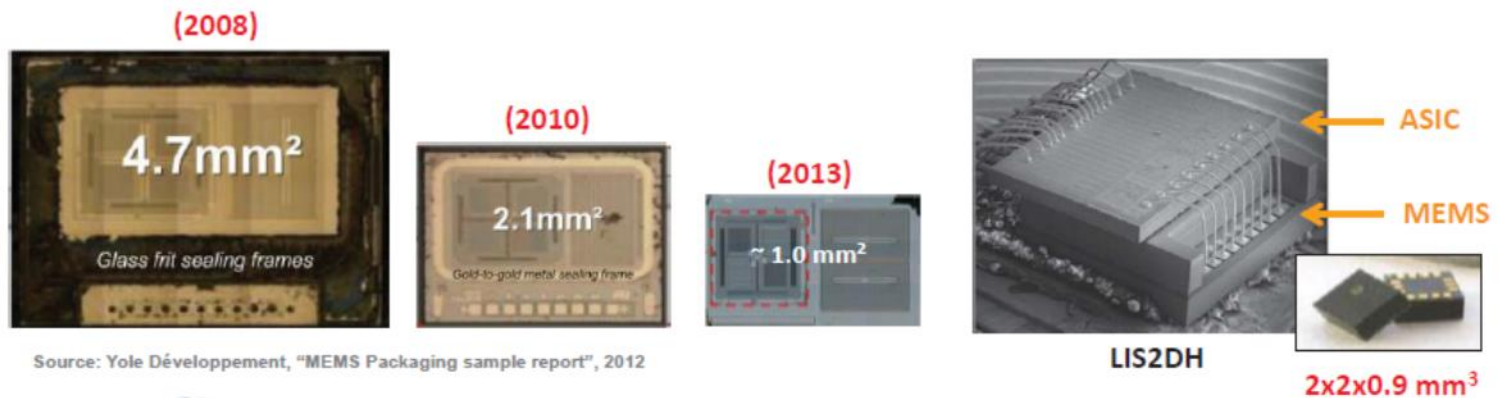
Package back view

- Analog Devices Accelerometer (Automotive)



M. Judy, Proc. Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop, Hilton Head Island, SC, Jun. 2004

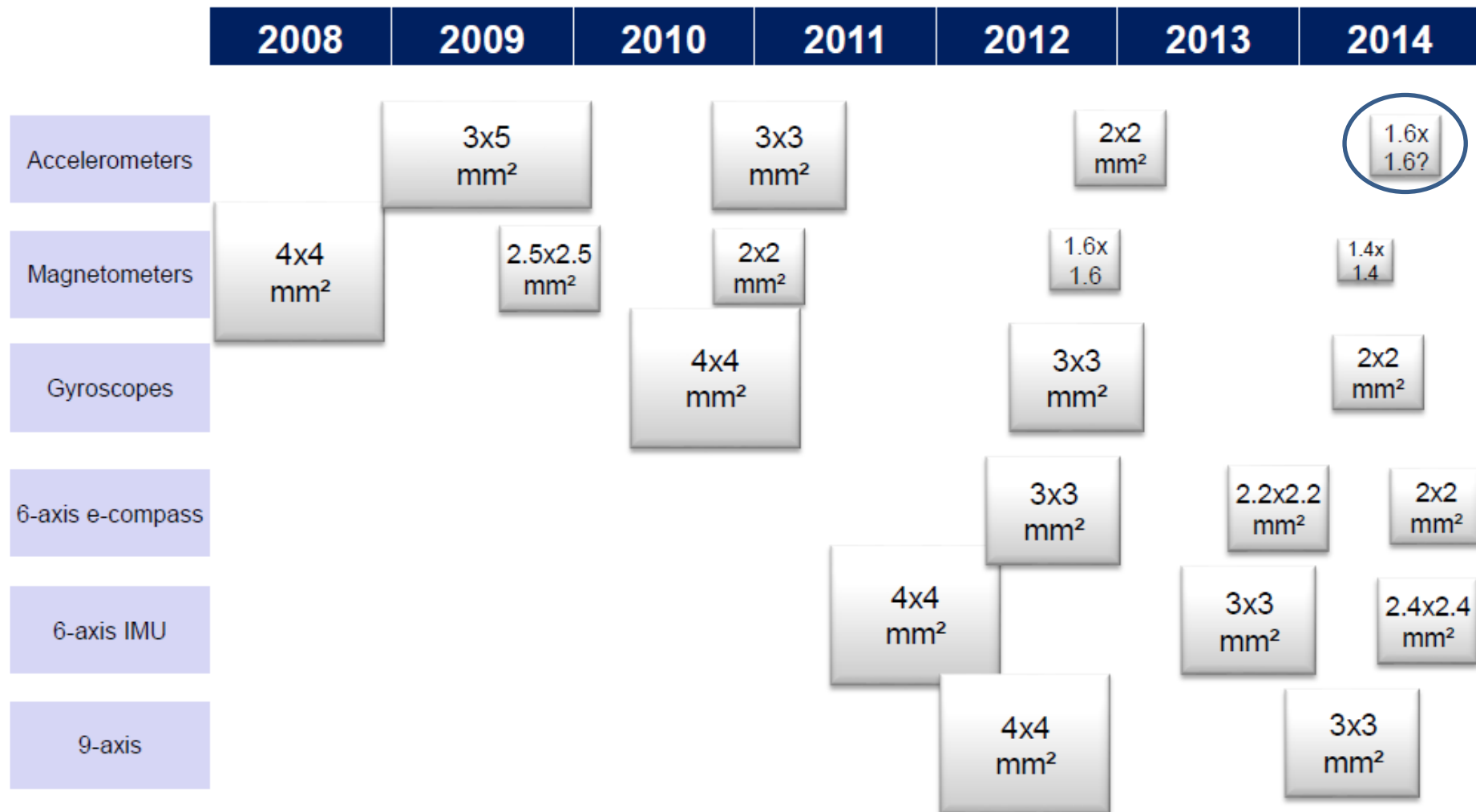
- STMicroelectronics Accelerometer (Consumer)



Source: Yole Développement, "MEMS Packaging sample report", 2012

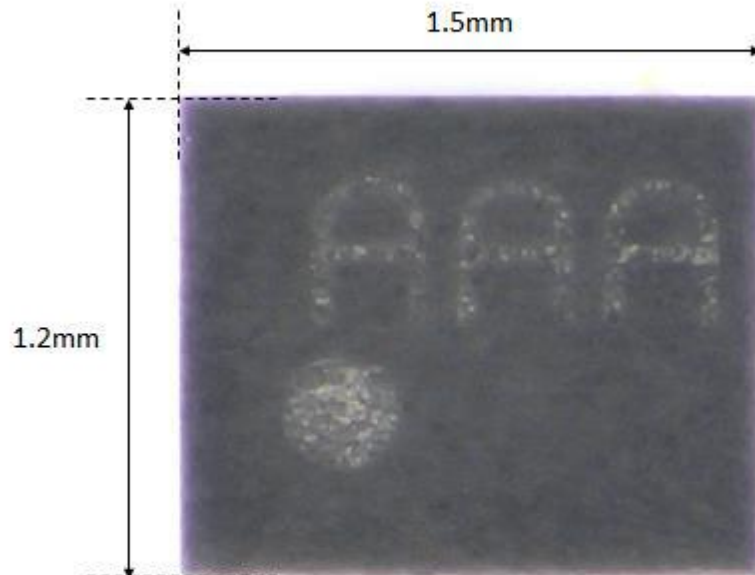
Component size is still decreasing

Typical package footprint for sensors used in mobile devices

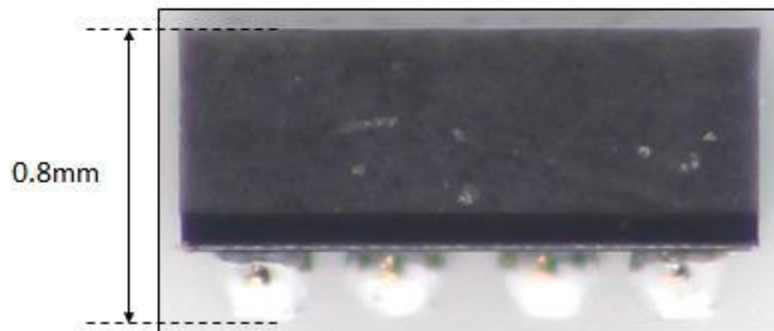


Акселерометърът с най-малки размери за 2014 г. BMA355 WLCSP 3-Axis Accelerometer на Bosch Sensortec

- Package: WLCSP 10-balls
- Dimensions: 1.2 x 1.5 x 0.8mm
- Ball Pitch: 0.4mm



Package top view



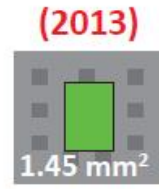
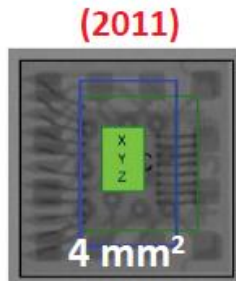
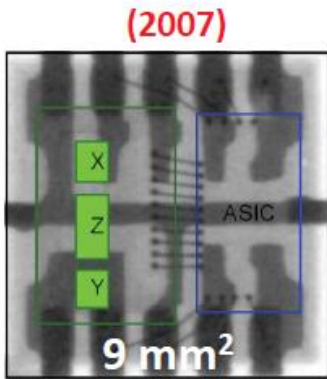
Package Side View



Package bottom view

С размери само 1.2x1.5x0.8mm, е най-малкият на пазара и с 60% по-малък обем от предшественика му с размери 2x2x0.9mm. Едно от приложенията на BMA355 е в iPhone 6 на Apple [14].

- Bosch Sensortec



1.5x1.2x0.8 mm³



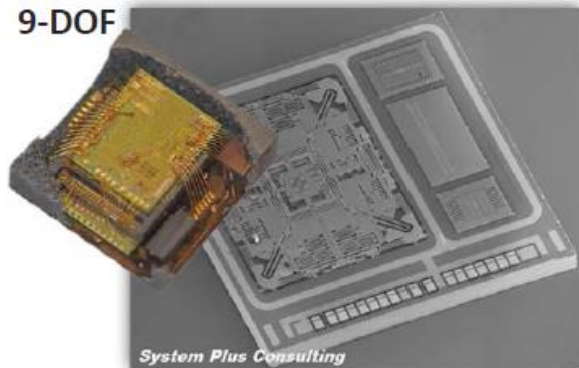
The Evolution of Compact Three Axis Accelerometers, St.J. Dixon-Warren, Chipworks Inc.

Source: www.bosch-sensortec.com

- Accelerometers in Multi-DOF Combos

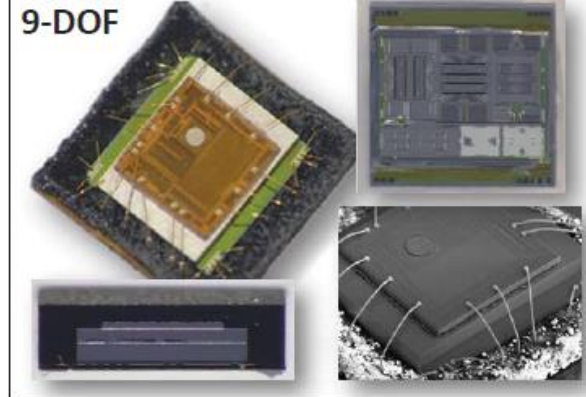
STMicroelectronics (LSMD333D)

9-DOF



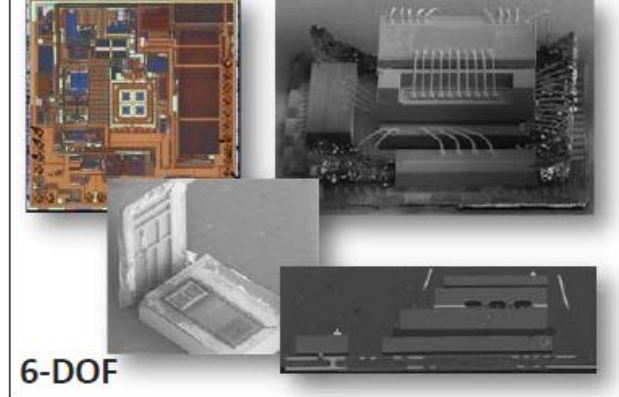
Invensense (MPU9150)

9-DOF



Bosch Sensortec (BMC050)

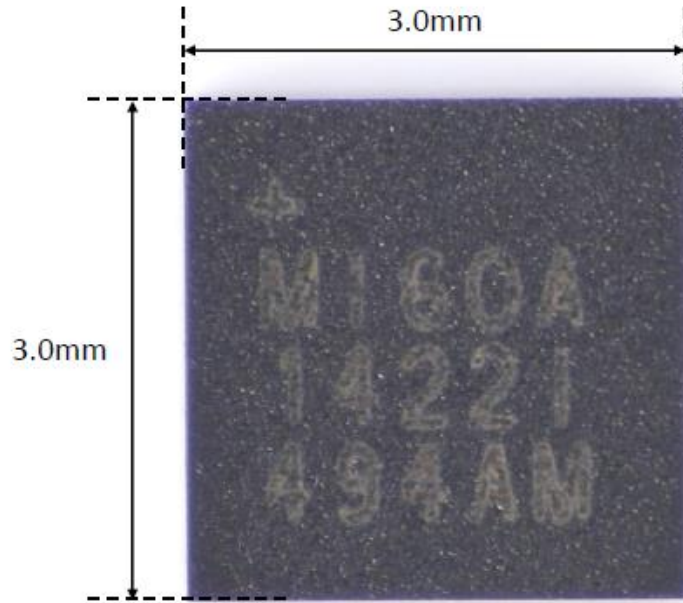
6-DOF



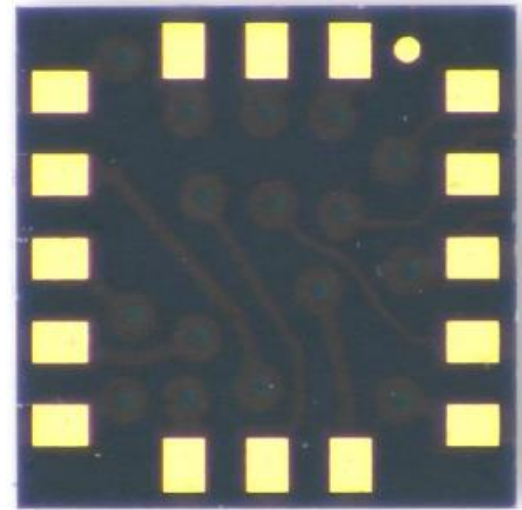
Source: System Plus Consulting – Reverse costing sample reports

- Package: LGA 16-pin
- Dimensions: 3.0 x 3.0 x 0.83mm
- Pin Pitch: 0.5mm

- Marking: MI60A
1422I
494AM



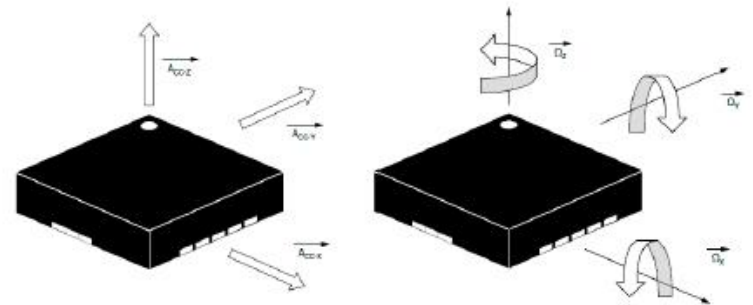
Package top view



Package bottom view

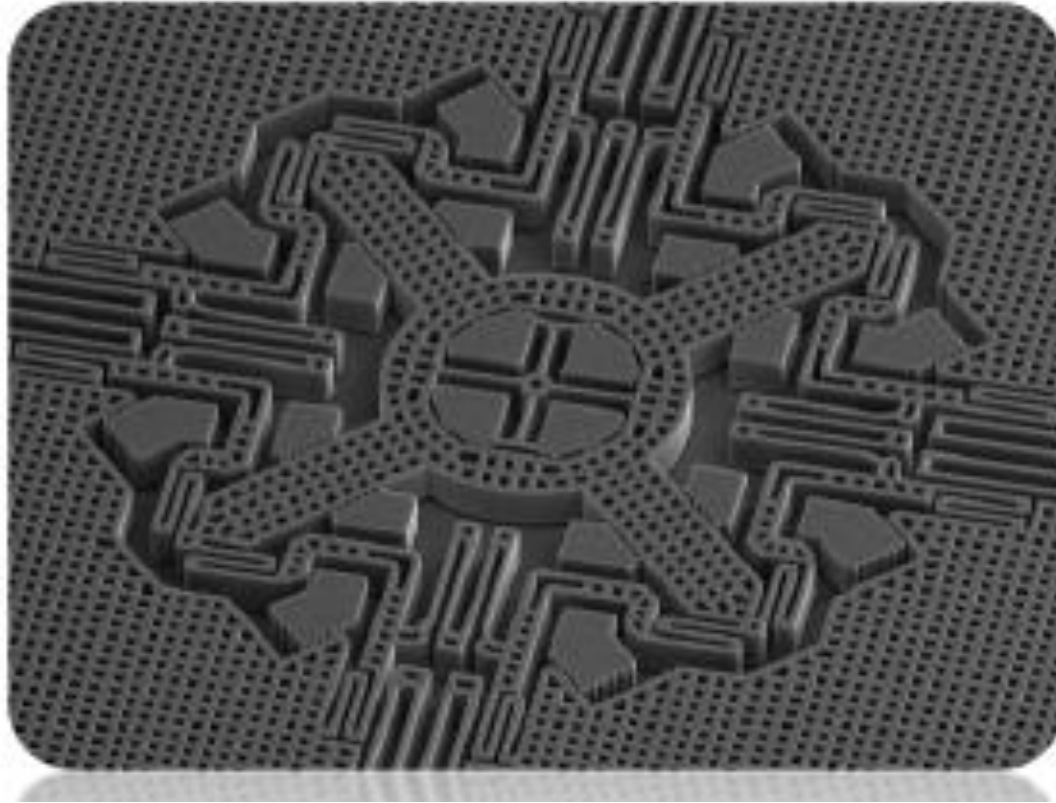


Package Side View



Orientation of Axes (from datasheet)

Maxim The MAX21100 is a monolithic 3-axis gyroscope and 3-axis accelerometer inertial Measurement Unit (IMU) assembled in industry's smallest and thinnest 3.0x3.0x0.83mm



Compared with state of the art 6-Axis MEMS IMU(3-AxisGyro+3- axis Accelerometer) supplied by STMicroelectronics and Bosch Sensortec, the new design developed by Maxim for this reference offers 17% to 19% reduction in silicon area for the MEMS die. Despite this potential significant cost advantage, the fabless business mode I used by Maxim reduces considerably this silicon area saving [20].

4. Представяне на вектор в две координатни системи

В координатна система $Ox_a y_a z_a$ векторът

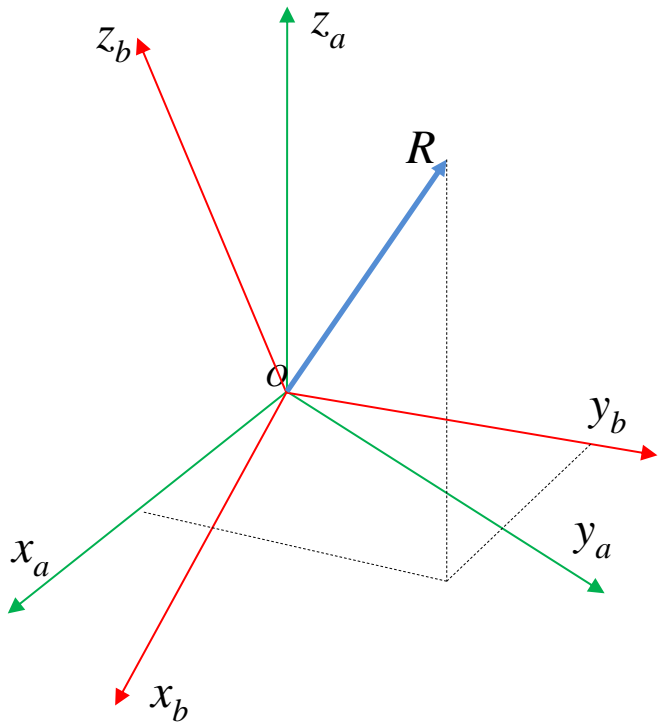
\vec{R} е

$$\vec{R} = R_1 \vec{i}_a + R_2 \vec{j}_a + R_3 \vec{k}_a$$

$R_1^{(a)} R_2^{(a)} R_3^{(a)}$ - декартови координати в $Ox_a y_a z_a$

$\vec{i}_a \vec{j}_a \vec{k}_a$ - Единичните вектори

Проекциите на вектора \vec{R} спрямо $Ox_b y_b z_b$ са



$$\begin{cases} r_1^{(b)} = \vec{i}_b \cdot \vec{R} = \vec{i}_b \cdot \vec{i}_a R_1^{(a)} + \vec{i}_b \cdot \vec{j}_a R_2^{(a)} + \vec{i}_b \cdot \vec{k}_a R_3^{(a)} \\ r_2^{(b)} = \vec{j}_b \cdot \vec{R} = \vec{j}_b \cdot \vec{i}_a R_1^{(a)} + \vec{j}_b \cdot \vec{j}_a R_2^{(a)} + \vec{j}_b \cdot \vec{k}_a R_3^{(a)} \\ r_3^{(b)} = \vec{k}_b \cdot \vec{R} = \vec{k}_b \cdot \vec{i}_a R_1^{(a)} + \vec{k}_b \cdot \vec{j}_a R_2^{(a)} + \vec{k}_b \cdot \vec{k}_a R_3^{(a)} \end{cases}$$

Проекциите на единичните вектори изразени чрез дирекционните косинуси са

$$\vec{i}_b \cdot \vec{i}_a = \cos(x_b, x_a) \quad \vec{i}_b \cdot \vec{j}_a = \cos(x_b, y_a) \quad \vec{i}_b \cdot \vec{k}_a = \cos(x_b, z_a)$$

Означаваме матрицата

която може да бъде разписана във вида

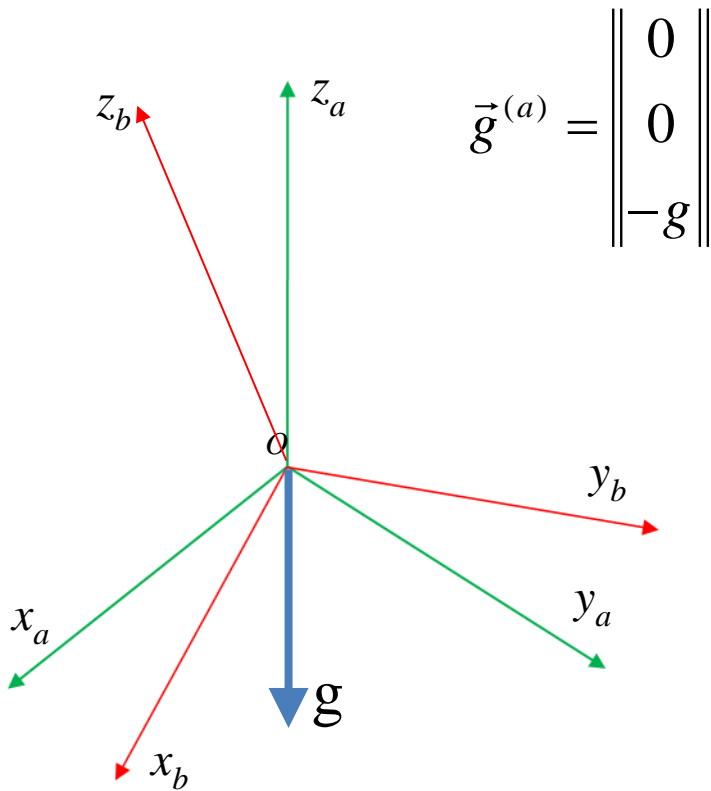
$$M_{ba} = \begin{vmatrix} \vec{i}_b \cdot \vec{i}_a & \vec{i}_b \cdot \vec{j}_a & \vec{i}_b \cdot \vec{k}_a \\ \vec{j}_b \cdot \vec{i}_a & \vec{j}_b \cdot \vec{j}_a & \vec{j}_b \cdot \vec{k}_a \\ \vec{k}_b \cdot \vec{i}_a & \vec{k}_b \cdot \vec{j}_a & \vec{k}_b \cdot \vec{k}_a \end{vmatrix} \quad M_{ba} = \begin{vmatrix} \cos(x_b, x_a) & \cos(x_b, y_a) & \cos(x_b, z_a) \\ \cos(y_b, x_a) & \cos(y_b, y_a) & \cos(y_b, z_a) \\ \cos(z_b, x_a) & \cos(z_b, y_a) & \cos(z_b, z_a) \end{vmatrix}$$

Векторът \vec{R} се представя в съответните координатни системи чрез матриците

$$\vec{R}^{(a)} = \begin{vmatrix} R_1^{(a)} \\ R_2^{(a)} \\ R_3^{(a)} \end{vmatrix} \quad \vec{R}^{(b)} = \begin{vmatrix} R_1^{(b)} \\ R_2^{(b)} \\ R_3^{(b)} \end{vmatrix}$$

Тогава векторът в координатната система $Ox_b y_b z_b$ е

$$\vec{R}^{(b)} = M_{ba} \vec{R}^{(a)}$$



$$\underline{g}^{(a)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

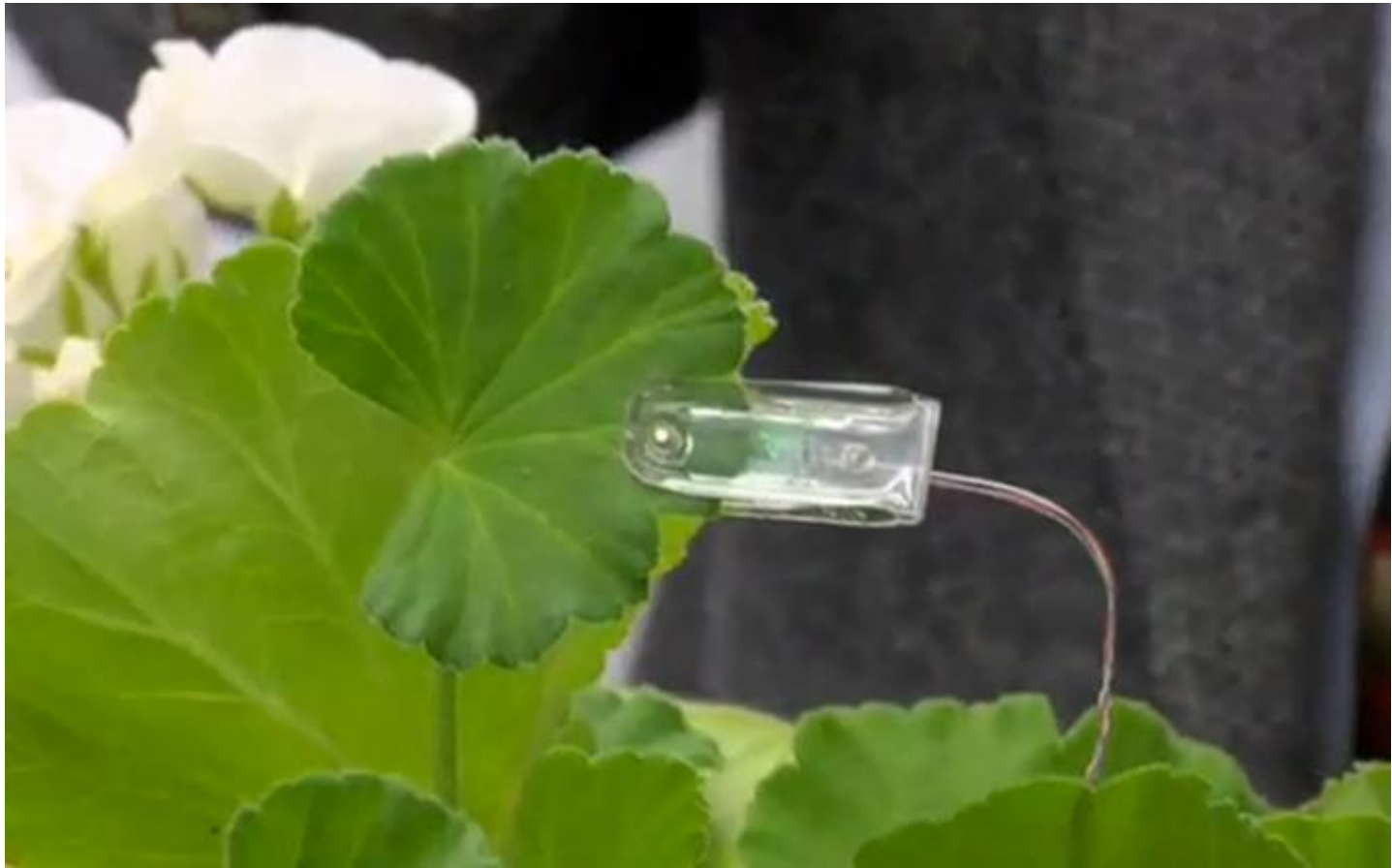
$$g_b = \begin{pmatrix} \cos(x_b, x_a) & \cos(x_b, y_a) & \cos(x_b, z_a) \\ \cos(y_b, x_a) & \cos(y_b, y_a) & \cos(y_b, z_a) \\ \cos(z_b, x_a) & \cos(z_b, y_a) & \cos(z_b, z_a) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -g \cos(x_b, z_a) \\ -g \cos(y_b, z_a) \\ -g \cos(z_b, z_a) \end{pmatrix}$$

$$\cos^2(x_b, z_a) + \cos^2(y_b, z_a) + \cos^2(z_b, z_a) = 1$$

За да вземем предвид земното ускорение е необходимо да знаем наклоните на трите оси на акселерометъра спрямо z_a .

Ако се измерва само земно ускорение g може да се определи наклонът на акселерометъра спрямо трите оси.



Обяснете как работи автоматизираната система за поливане!

ЛИТЕРАТУРА

1. Grewal M. S., Angus P. Andrews A. P., Bartone C. G., Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration, 3th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2013.
2. Kempe V., Inertial MEMS Principles and Practice, Cambridge university press, 2011.
3. Joel Voldman, course materials for 6.777J / 2.372J Design and Fabrication of Micro electromechanical Devices, Spring 2007. MIT OpenCourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology. Downloaded on [25.5. 2014].
4. Colin Tse, Design of a Power Scalable Capacitive MEMS Accelerometer Front End, M. Sc. Thesis, University of Toronto, 2013.
5. Senturia, Stephen D. Microsystem Design. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001, p. 502. ISBN: 9780792372462.
6. James J. A., Micro Electro Mechanical System Design, Taylor & Francis Group, LLC, 2005, p. 67.
7. Beeby S., MEMS mechanical sensors, Artech House, Inc. 2004.
8. Rudolf, F., et al., “Precision Accelerometers with μg Resolution,” Sensors and Actuators, Vol. A21-23, 1990, pp. 297–302.

9. Allen, H. V., S. C. Terry, and D. W. DeBruin, "Accelerometer Systems with Self-Testable Features," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, 1989, pp. 153–161.
10. Kempe V., *Inertial MEMS Principles and Practice*, Cambridge University Press, 2011.
11. Chris Baldwin, Jack Niemczuk, Jason Kiddy, and Toni Salter, *Review of Fiber Optic Accelerometers*, Systems Planning & Analysis, Inc. Advanced Engineering Development Program.
12. Jiang Q., Yang M., A high sensitivity vector accelerometer based on tri-axial fiber Bragg grating, *Optica Applicata*, Vol. XLII, No. 4, 2012.
13. Felix Levinzon, *Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics*, Springer, 2015.
14. Yole Développement report, *Inertial MEMS Manufacturing Trends 2014*, The shift from standalone devices to integrated inertial measurement units will come through both optimization of current technologies and introduction of disruptive approaches, 2014.
15. Serrano, D.E., Jeong, Y. , Keesara, V. , Sung, W.K. Ayazi, F., Single proof-mass tri-axial pendulum accelerometers operating in vacuum, *Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2014 IEEE 27th International, 2014.
16. Serrano, D.E., *Design and analysis of MEMS accelerometers*, *Conference of sensors IEEE*, 2013.
17. Joel Voldman, course materials for 6.777J / 2.372J *Design and Fabrication of Microelectromechanical Devices*, Spring 2007. MIT open CourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology. Downloaded on [14.01 2014].

18. Dauderstadt U A, de Vries P H S, Hiratsuka R, Sarro P M 1995 Silicon accelerometer based on thermopiles. *Sens. Actuators A Phys* 46, 201–204.
19. Yogesh B. Gianchandani, Osamu Tabata, Hans Zappe, *Comprehensive microsystems*, Elsevier, 2008.
20. Reverse costing analysis, Maxim MAX21100, Yole Developpement, Sept. 2014.
21. V. Milanovi, E. Bowen, N. Tea, J. Suehle, B. Payne, M. Zaghoul, and M. Gaitan, “Convection-Based Accelerometer and Tilt Sensor Implemented in Standard CMOS,” *Proc. Int. Mech. Eng. Conf. and Exp., MEMS Symposium, Anaheim, Nov. 1998.*

Благодаря за вниманието!

THANKS!

