

Приложение на MEMS и NEMS технологията за автомобилни сензори – част 2

Доц. д-р Мария Александрова

Сензори за двигателя

- *Сензор за охлаждане на двигателя*
- *Сензор за нивото на охлаждащата течност*
- *Сензор за температура на горивото*
- *Сензор за количество на впръскваната горивна смес*
- *Сензор за количество на кислорода*

Сензори за трансмисията и ходовата част

- *Акселерометри*
- *Жироскопи*
- *Сензори за ъгъл*
- *Сензори за обороти, скорост и изминато разстояние*
- *Сензори за налягане*

Сензори за безопасност и комфорт

- *Сензори за въздушните възглавници*
- *Сензори за паркиране*
- *Сензори за предпазни колани*
- *Сензори, чувствителни на докосване за диспелите*

Жироскопи (Angular Rate Sensor)

Сензори за ъглова скорост (да се прави разлика със сензори за ъгъл angle sensor)



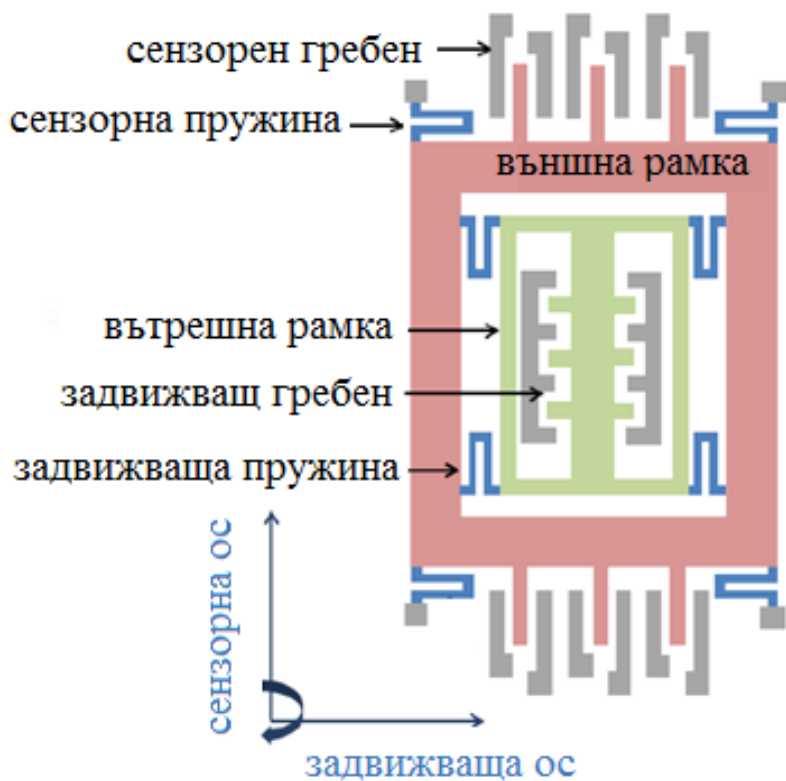
Ъгловата скорост ω на въртящо се тяло показва на колко градуса то се завърта за 1 s и съответно има измерение $^{\circ}/s$, като може да се измерва ъгловата скорост в двете посоки на въртене.

← Принцип на работа на жироскопа - сила на Кориолис.

<https://www.siliconsensing.com/technology/mems-gyroscopes/>

Действието на MEMS жироскопите се основава на ефекта на Кориолис - при въртене на кръгло тяло с ъглова скорост ω всяка негова точка на разстояние a от центъра има тангенциална скорост (спрямо неподвижната земя) $a \cdot \omega$. Когато точката се движи по радиуса със скорост v , тангенциалната ѝ скорост също се променя. Тъй като промяната на каквато и да е скорост представлява ускорение, то това на движещата се точка се нарича Кориолисово ускорение и е $2 \cdot \omega \cdot v$.

Ако точката е някакъв обект с маса m , ускорението определя сила $2 \cdot \omega \cdot v \cdot m$ върху него, която е насочена перпендикулярно на радиуса на тялото. Тази сила премества обекта перпендикулярно на радиуса, като посоката зависи от това каква е посоката на въртене на тялото.

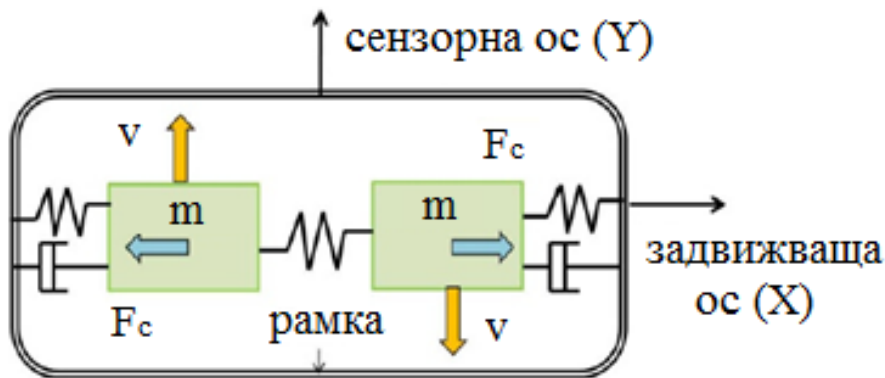


MEMS жирокоп – опростен вид

Масово използвана микроелектромеханична структура е вибрираща система, която се задвижва от създадено около нея електростатично поле с две степени на свобода. В основата си, тя има вибрационен масо-елемент. Вибриращата единица маса е окачена в свободно състояние към рамка с помощта на гъвкави греди, които работят и като механични пружини. Масо-елементът е подложен на вибрации при резонансна честота посредством електростатична сила, предизвикваща движение по задвижващата ос. Завъртането може да бъде измерено по метода на диференциалния капацитет чрез използване на система с гребеновидни (гребенчати) електроди.

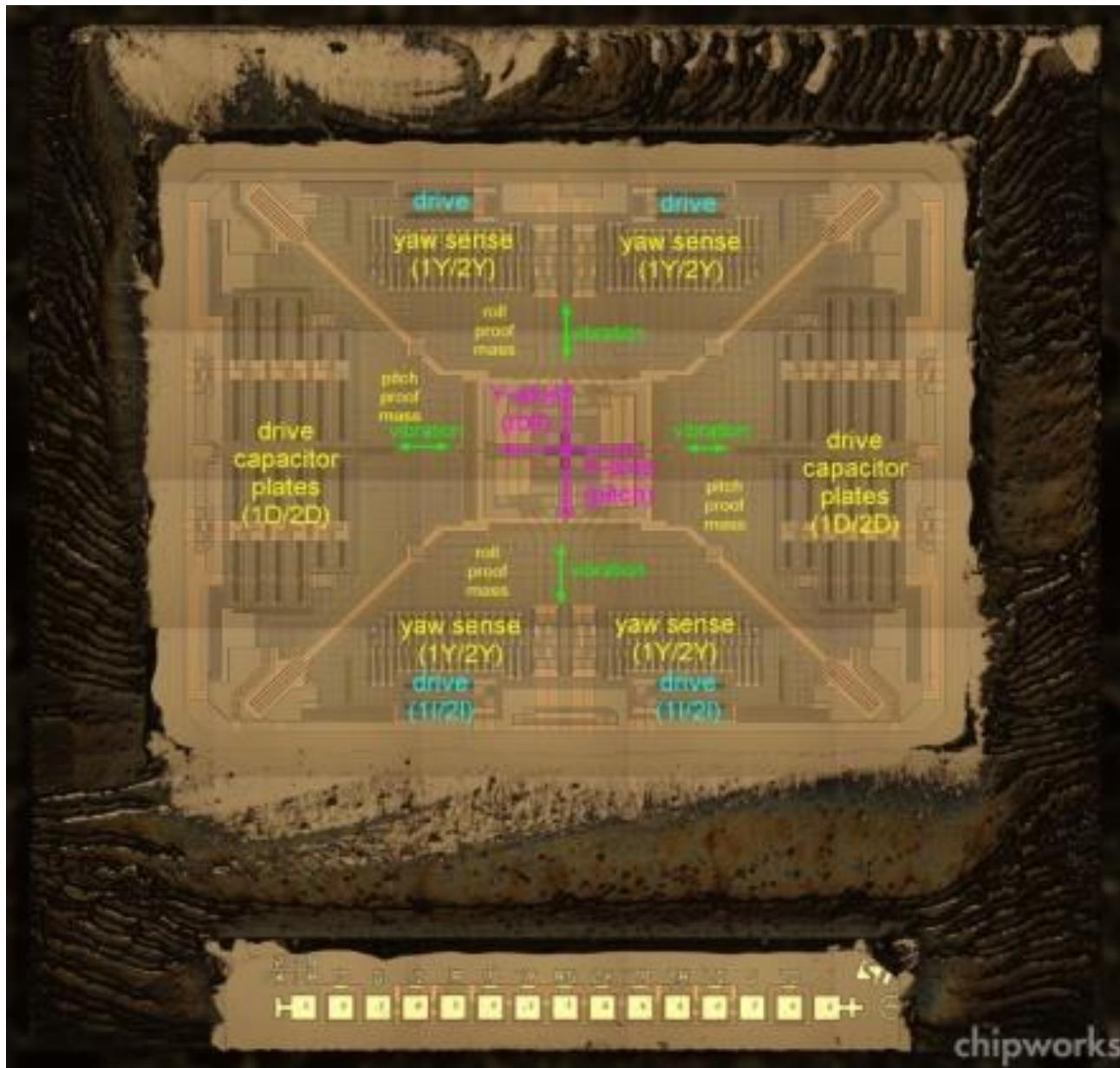


Корпусът на комбинирана сензорна система (акселерометър + жироскоп) за нуждите на автомобилната електроника (вляво) и корпус на интегралната схема на жироскопа (вдясно).

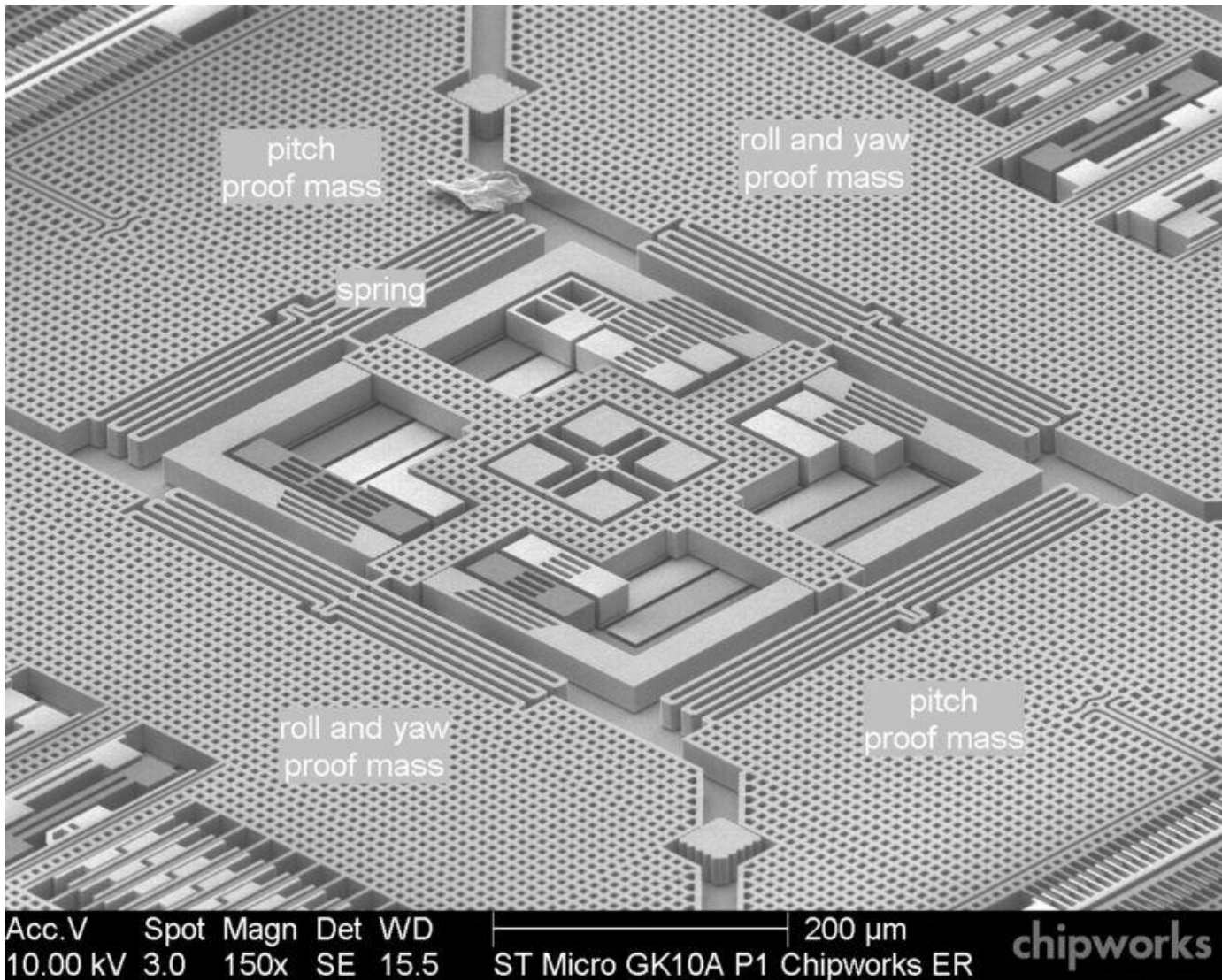


Еквивалентно представяне на жироскоп с 2 масо-елемента

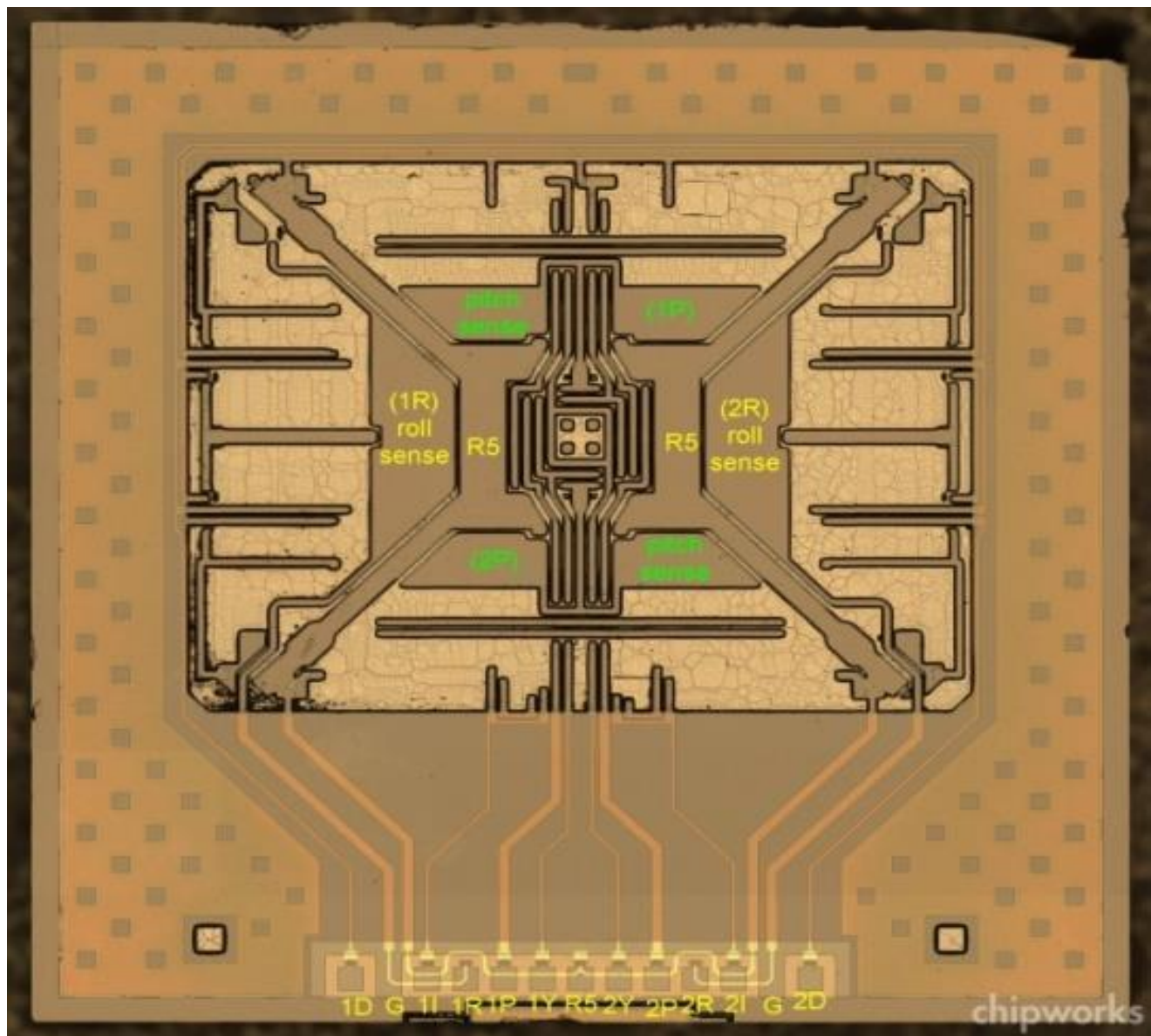
Тази специална конструкция помага за взаимно компенсиране на общата задвижваща сила причинена от нежелани околни вибрации и шокови удари, на които може да е подложена структурата.



Разхерметизиран корпус на многоосев жирокоп

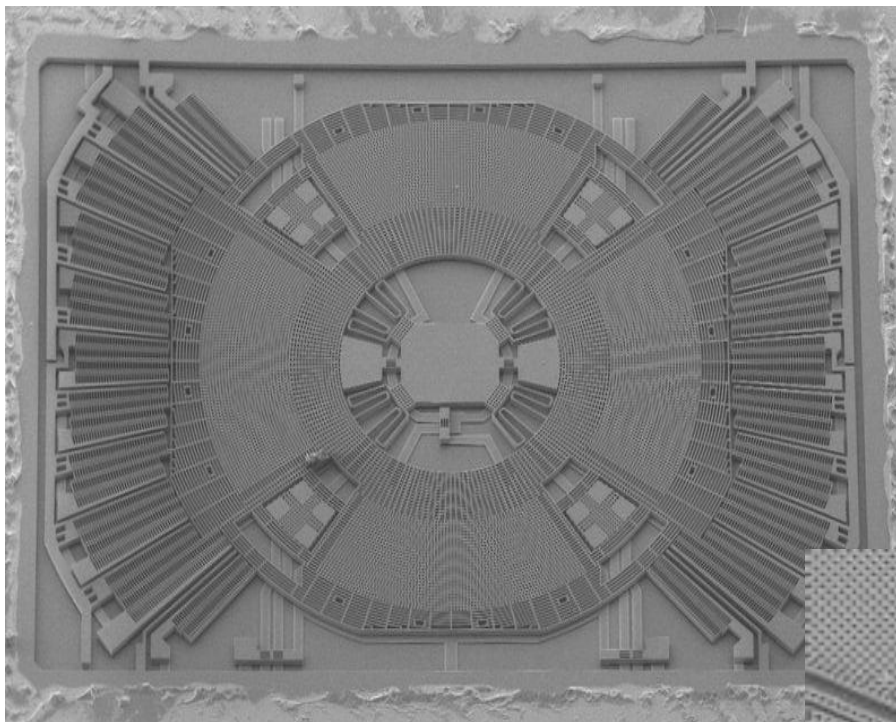


Снимка от сканиращ електронен микроскоп SEM на централната зона

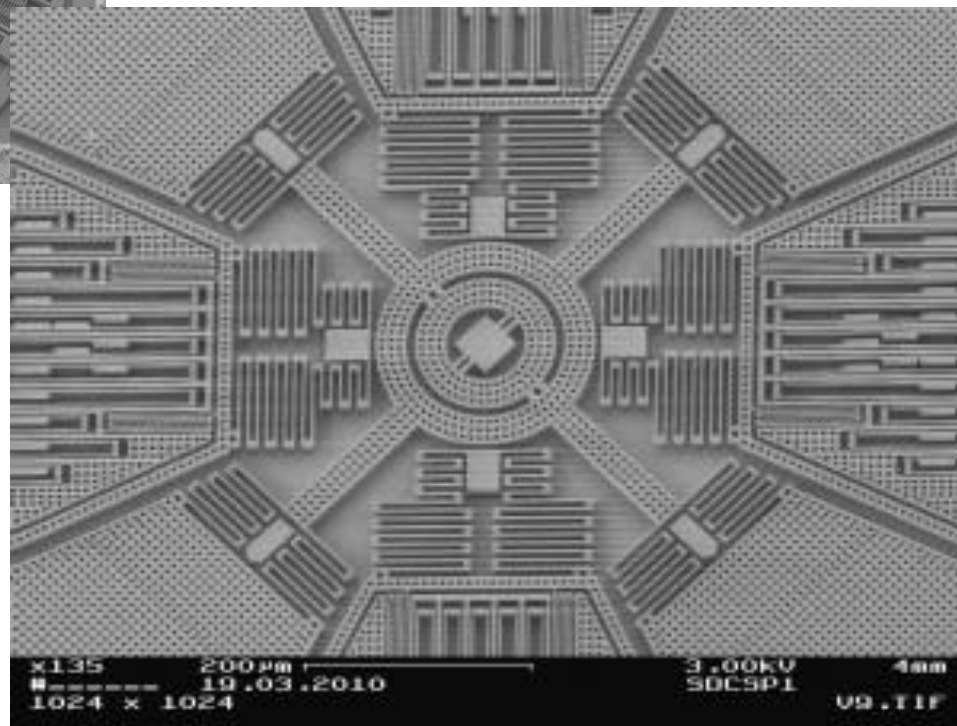


Отстранен горен полисилициев слой на MEMS, разкриващ долния взаимосвързан полисилициев слой.

- Вместо метализация, кондензаторните електродни плочи са реализирани с полисилиций (**polySi**) легиран до определена степен, за да се постигне ниско електрическо съпротивление.
- Заради подвижните части трябва да се осигури твърдост, износоустойчивост и слаба промяна на параметрите на функционалния елемент с времето, затова се използва обемна микрообработка (**bulk micromachining**) на поликристален силиций с дълбоко йонно реактивно ецване, като се разчита на големия модул на Юнг на силиция.
- За намаляване на цената може да се направят структури с жертвени слоеве с повърхностна обработка на полисилициевите тънки слоеве чрез **CVD**, но надеждността е по-ниска.
- Отворите са реализирани чрез дълбоко реактивно йонно ецване (**DRIE**) до дъното на силициевия кристал и имат за цел да изравнят налягането под и над подвижните окачени участъци.
- Подобряването на чувствителността става чрез увеличаване на броя на микро-/нано кондензаторните структури и диференциално измерване на изменението на капацитетите между тях вместо относителното изменение спрямо начална стойност на същия микрокондензатор.



Сложни конструкции на жирокопи с подобрена чувствителност и компенсирани грешки от земното ускорение.



Методика за проектиране на жироскоп

$$M = M_m + M_b + M_c - M_e$$

Където M_m е маса на вътрешната и външната рамки, M_b е масата на окачващите греди (пружини), M_c е масата на задвижваща и сензорна гребенчата структура, а M_e е масата на ецваните отвори.

Здравината на окачващата пружинна микрогрета (K_x) и тази на чувствителната микрогрета (K_y) зависят от конструкцията на жироскопа.

$$K_x = K_y = \frac{4 \cdot E \cdot t_{b1} \cdot w_{b1}^3}{l_{b1}^3} + \frac{4 \cdot E \cdot t_{b2} \cdot w_{b2}^3}{l_{b2}^3}$$

където E е модулът на Юнг на полисилиция, t_{b1} и t_{b2} , w_{b1} и w_{b2} , l_{b1} и l_{b2} са дебелина, ширина и дължина на двете микрогреди – задвижваща и детекторна.

Допустимите или гранични честоти на задвижването и на детекторната част са

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{M}} \quad f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_y}{M}}$$

Загуби в масо-чувствителния елемент ($C_{proof\ mass}$) и коефициентът на затихване на гребенчатите структури ($C_{comb\ structure}$):

$$C_{proof\ mass} = \frac{\mu \cdot A_{Proof\ mass}}{(1 + 2 \cdot K_n) \cdot h}$$

където μ е вискозитет на въздуха, $A_{proof\ mass}$ е площта на масо-чувствителния елемент, K_n е числото на Кнудсен и h е разстоянието между масо-чувствителния елемент и подложката, над която е окачен.

$$C_{Comb\ structure} = \frac{\mu \cdot N \cdot A_{combs}}{g_c + \lambda}$$

N е броят на гребените, A_{combs} е площта на гребените, g_c е разстоянието между пръстите на гребена и λ е среден свободен пробег на молекулата на газа (в случая въздуха) в междините между гребените.

Електростатичната сила, която задейства преместването на гребените е

$$F_d = \frac{2.28 \cdot N \cdot \epsilon \cdot t_c \cdot V_{dc} \cdot V_{ac}}{g_c}$$

където N е броят на кондензаторни структури, образувани от гребенчатата структура, ϵ е диелектричната проницаемост на въздуха, V_{dc} е постоянно напрежение, V_{ac} е променливо напрежение.

От общата електростатична сила в структурата F_{net} може да се определи отместването на системата по ос X - X_{static} и качествения фактор Q_{drive} на задвижващата част.

$$X_{static} = \frac{F_{net}}{K_x}$$

$$Q_{drive} = \frac{\sqrt{K_x M}}{C_{drive}}$$

Отместването на задвижващата част е произведение от горните две.

$$X_{drive} = X_{static} * Q_{drive}$$

а скоростта, с която се случва това отместване е

$$V_{drive} = X_{drive} * 2 \pi * f_x$$

Силата на Кориолис F_c вече може да бъде определена

$$F_c = 2 * M * \Omega * V_{drive}$$

където Ω е въпросното ъглово въртене на което е подложен жirosкопът. От тук отместването на системата по ос Y (Y_{static}) и качествения фактор Q_{sense} на сензорната част, както и отместването на сензорната част Y_{sense} са:

$$Y_{static} = \frac{F_c}{K_y}$$

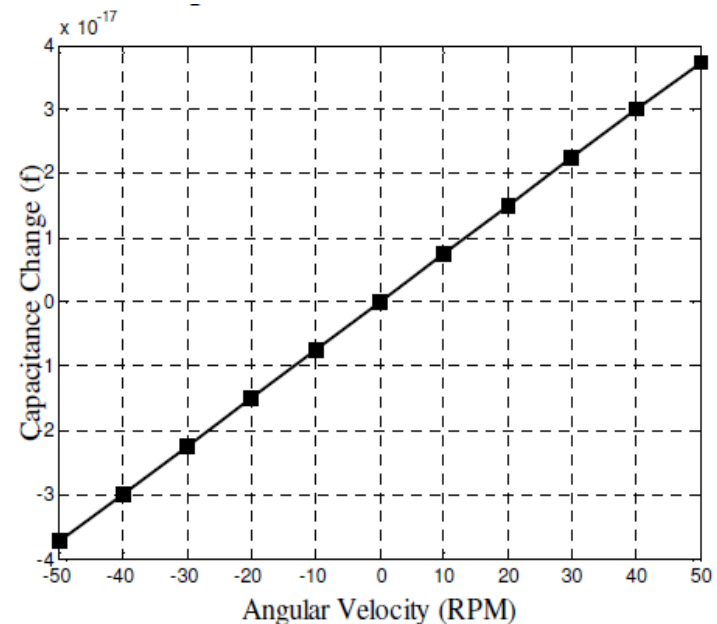
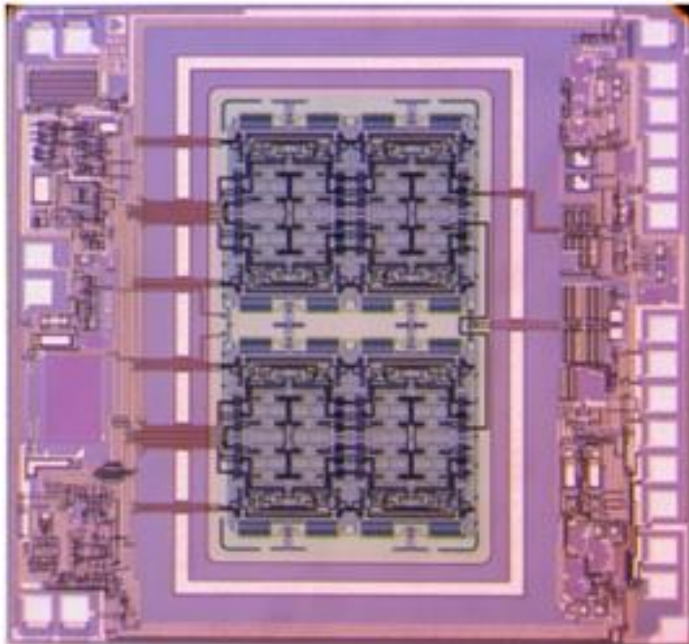
$$Q_{sense} = \frac{\sqrt{K_y M}}{C_{sense}}$$

$$Y_{sense} = Y_{static} * Q_{sense}$$

Изменението на диференциалния капацитет е:

$$\Delta C_b = \frac{\epsilon l_{p_c} t_c Y_{sense}}{(g_c)^2}$$

където ϵ е проницаемост на въздуха, l_{p_c} е припокриването на гребенчатите пръсти, t_c е дебелина на пръста на гребена, Y_{sense} е отместването на сензорната част, g_c е разстояние между пръстите на гребена.



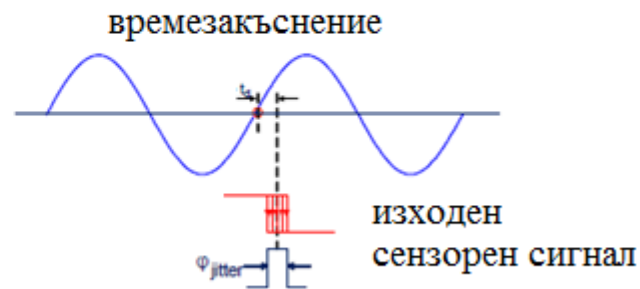
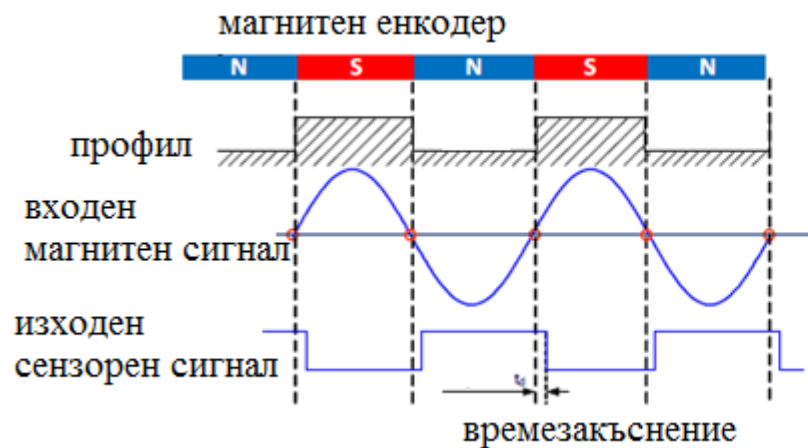
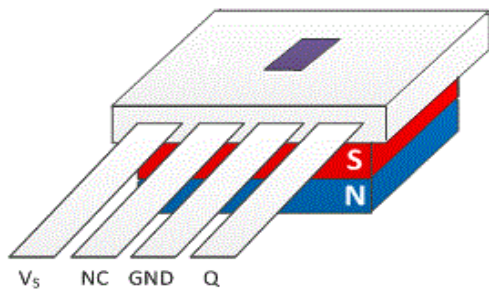
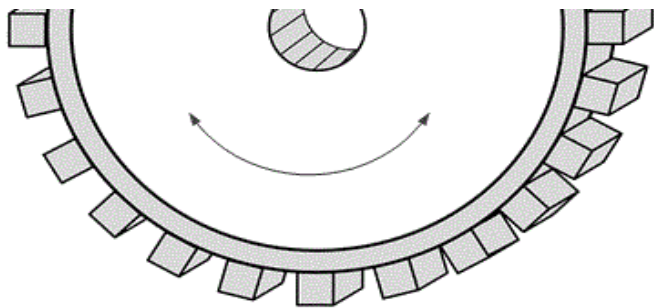
Горните и долните резонаторни двойки на фигурата са механично независими и работят противофазно. В резултат на това те измерват същата величина на въртене, но дават изходни величини с противоположен знак. Следователно, разликата между сигналите на сензора се използва за измерване на ъгловата скорост. Това компенсира неротационни сигнали, които засягат и двата сензора.

Сензори за обороти, скорост и изминато разстояние (Wheel speed sensor, Tachometer)

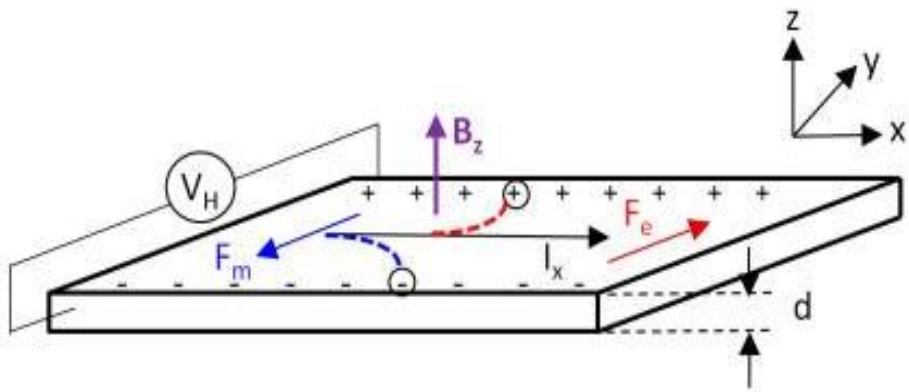
Най-често те са ИС от елемент на Хол и електронен блок, закрепвани неподвижно на 1-2 mm от въртящия се обект, който съдържа по периферията си магнити с редуващи се северен и южен полюс.

Поставянето по подходящ начин на два сензора на Хол в една ИС позволява измерване и на посоката на въртене (*Sensor for rotation speed and direction*).

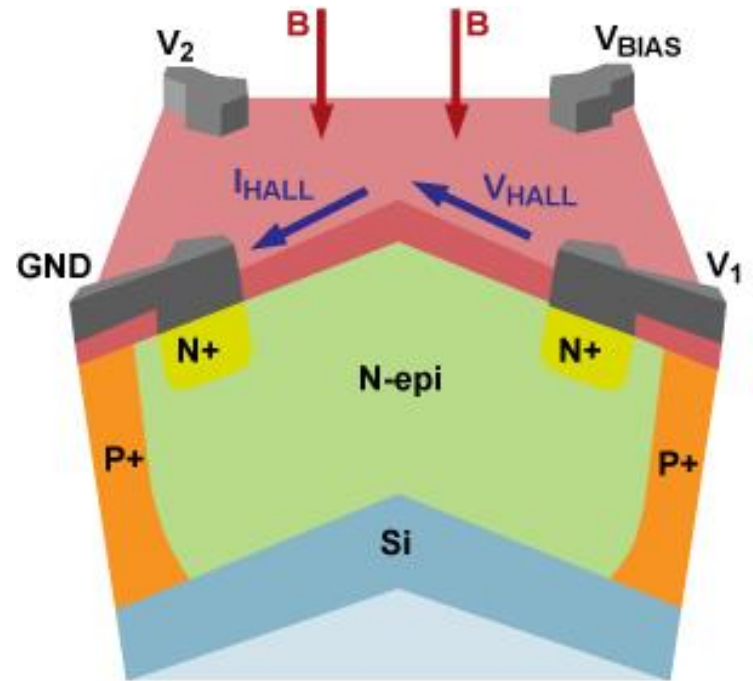
Връзката между оборотите и диаметъра на колелата на автомобила позволява на основата на оборотомери да се реализират скоростомери (**Tachometer**)



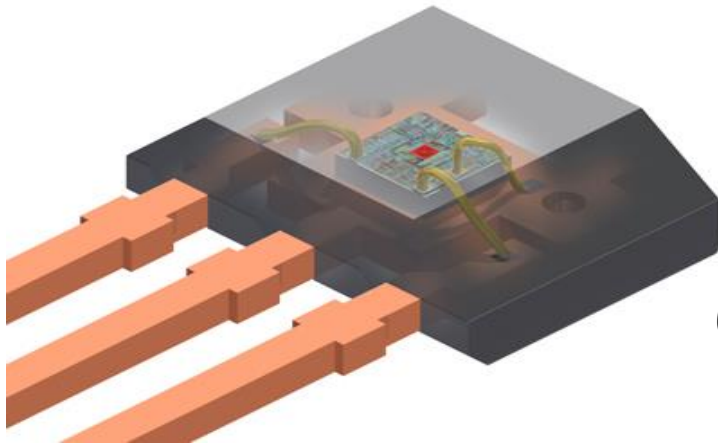
Принцип на действие на сензора за обороти



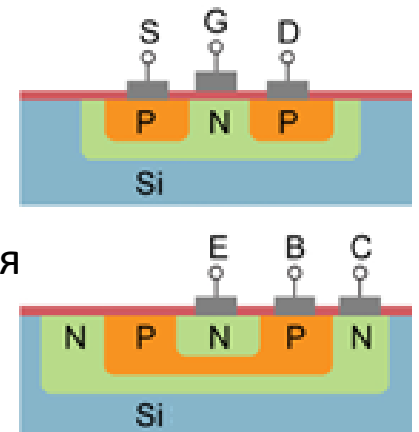
Ефект на Хол



Технологично изпълнение на Хол елемент

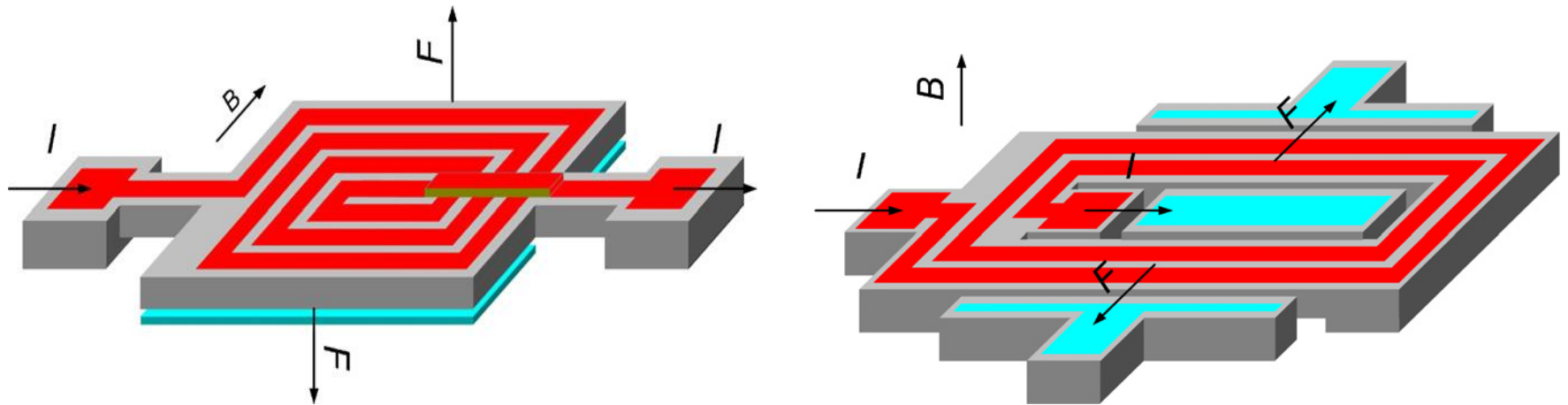


Интегриране съвместно с транзисторна MOS или биполярна планарна технология



Сензори за ъгъл (*Angle Sensor*)

Действието им се основава на промяната на електрическо съпротивление под действието на магнитно поле, което определя термина магниторезистивни (magnetoresistance – MR). Сред приложенията в автомобилите са отчитане ъгъла на завиване на колелата, положението на чистачките и на клапани.



Торсионен резонатор и резонатор от тип камертон

Торсионният и камертонният резонаторни елементи регистрират компонента на магнитното поле надлъжно и перпендикулярно на чип-повърхността, съответно.

Силата на Лоренц F и въртящият момент τ зависят от тока, магнитната индукция и геометричните размери на проводящата структура – тънкослойна намотка – L дължината и S напречното ѝ сечение.

$$\vec{F} = i_c \vec{L} \times \vec{B}$$

$$\vec{\tau} = i_c \vec{S} \times \vec{B}$$

Най-слабото магнитно поле, което може да се регистрира е ,

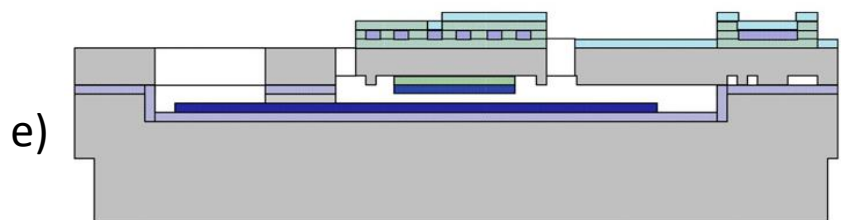
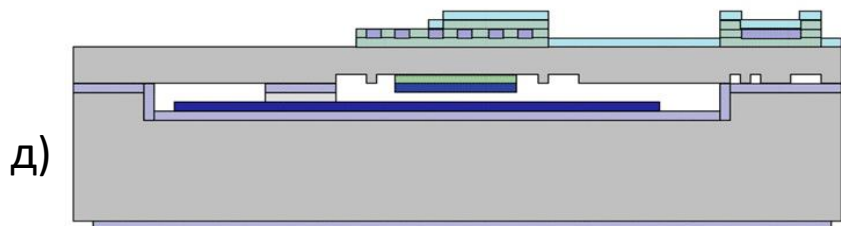
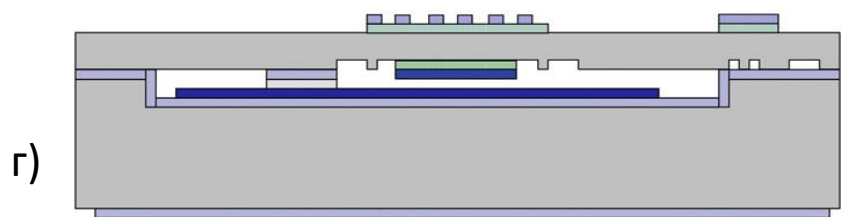
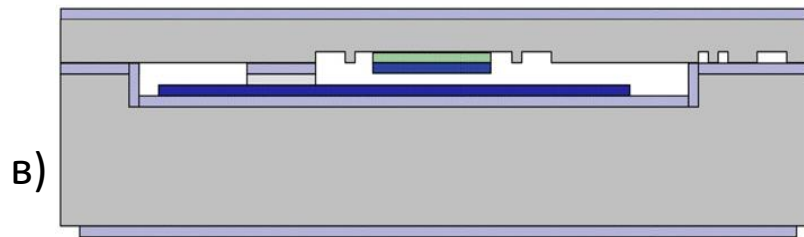
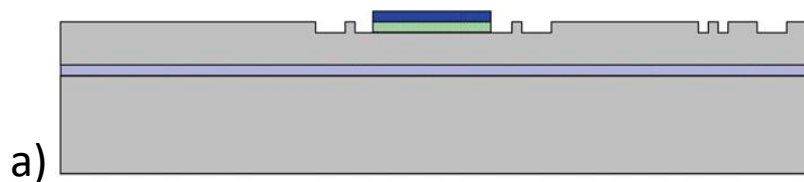
$$B_{\min} = \frac{f_{n,m}}{F} B$$

където $f_{n,m}$ термомеханична компонента и зависи от константа на Болцман k_B , T – температура, коефициент на загуби на енергията при преобразуване R_m и W – лента на пропускане според честотата на случване на събитието.

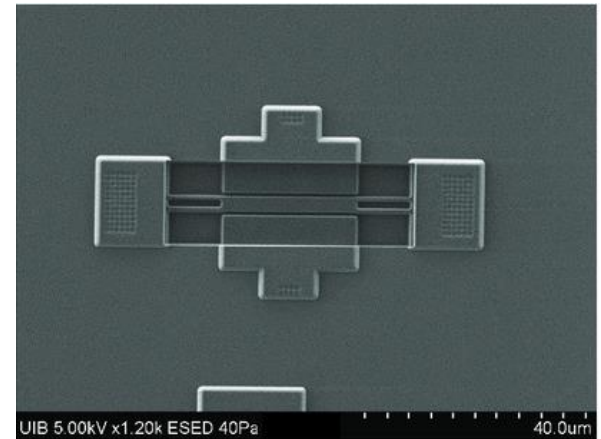
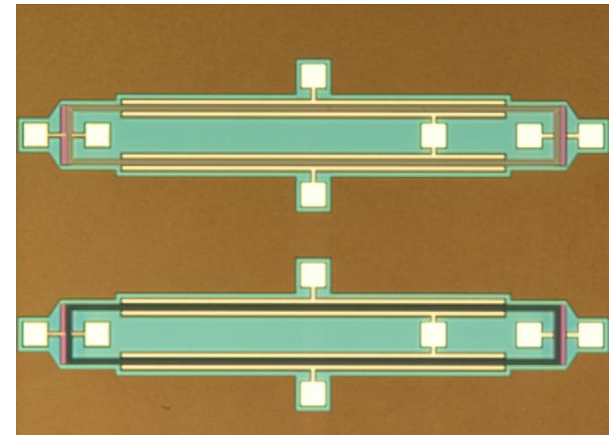
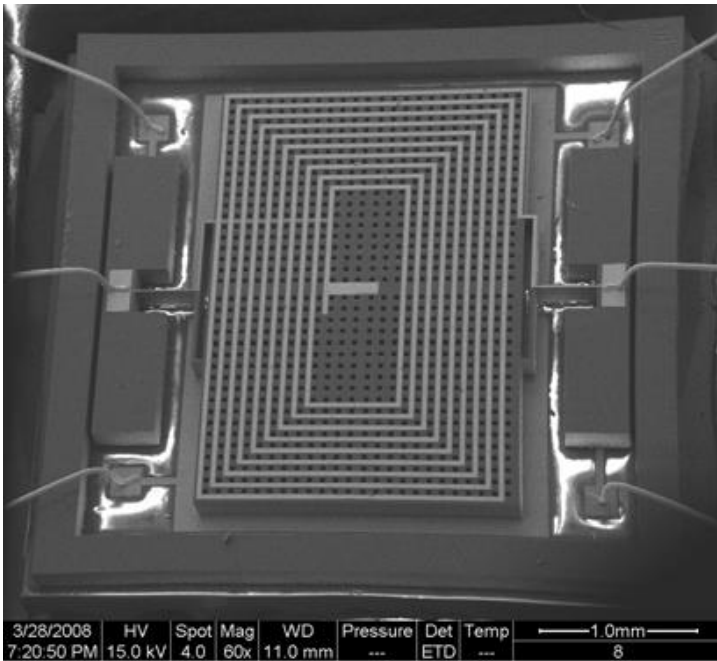
$$f_{n,m} = \sqrt{4k_B T R_m W}$$

Разделителната способност на сензора по отношение на минимално регистрируем ъгъл зависи от тази термомеханична компонента, от ъгъла φ между посоката на магнитното поле и активната ос на магнитометъра и силата на Лоренц при ъгъл 90° , където тя би следвало да е максимална.

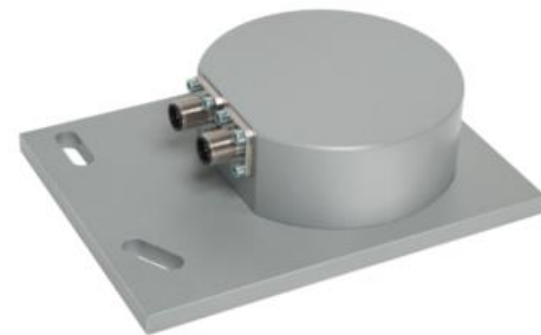
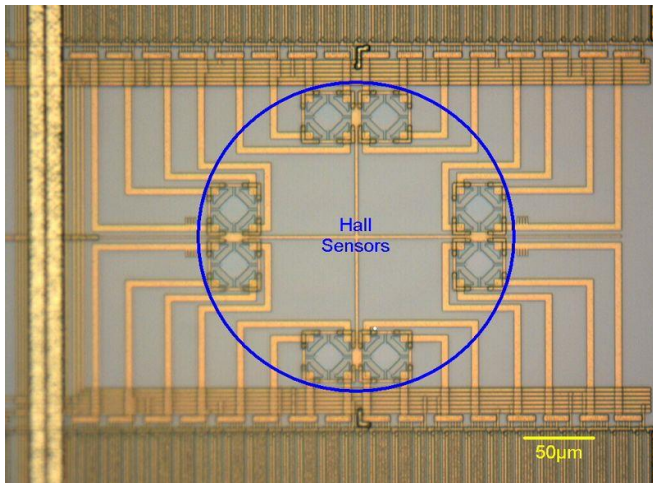
$$\varphi_{\min} = \frac{f_{n,m}}{F_{\max} \cos \varphi}$$



а) метализация за компенсирание на термични ефекти, като топлинни линейни разширения; б) ецване на кухня и метализиране на електроди; в) директно бондиране на пластините и премахване на оксиден слой; г) структуриране на възбудителна намотка; д) отлагане на изолационни слоеве и алуминиева метализация за електрическо свързване; е) ецване на жертвени слоеве.



Снимки на торсионен резонатор и резонатор от тип камертон



<https://www.brosa.net/>

Сензори за налягане

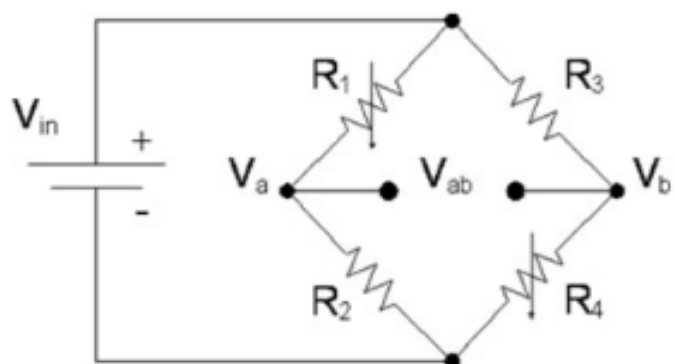
Tire Pressure Monitoring Sensor (TPMS)



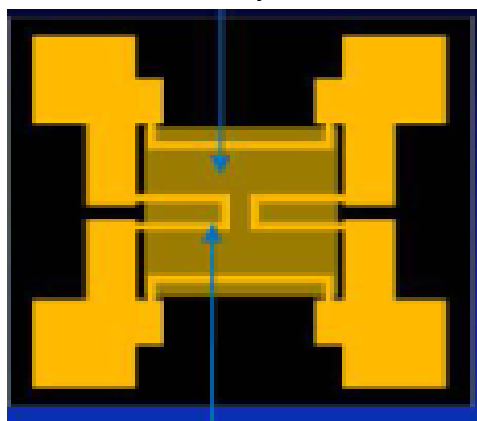
От тази категория с най-голямо приложение са предназначените за измерване налягането на гумите.

Формира се от него сигнал с определена честота 434 MHz, който се изпраща веднъж в минута при нормално налягане и на всеки 15 s при намалено под долната граница. Приема се от блок, който задейства индикатор за намалено налягане на таблото на водача. Съвкупността от сензора и неговото закрепване върху гумата, обработващия блок с батерия за хранване и антена за излъчване обикновено представлява модул със специфична конструкция за модела автомобил.

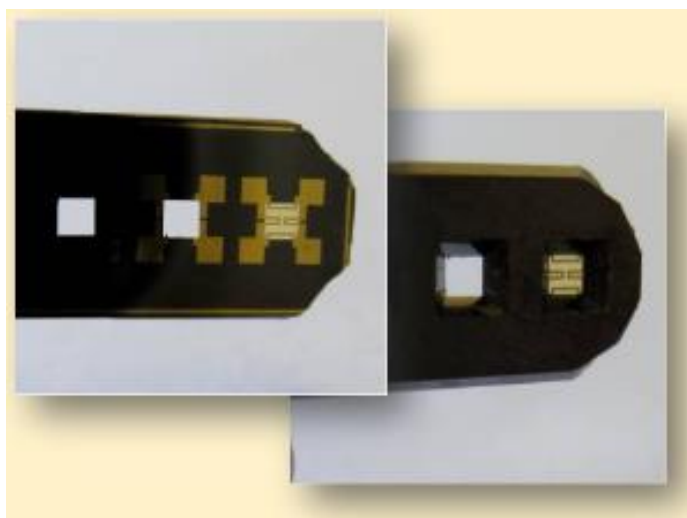
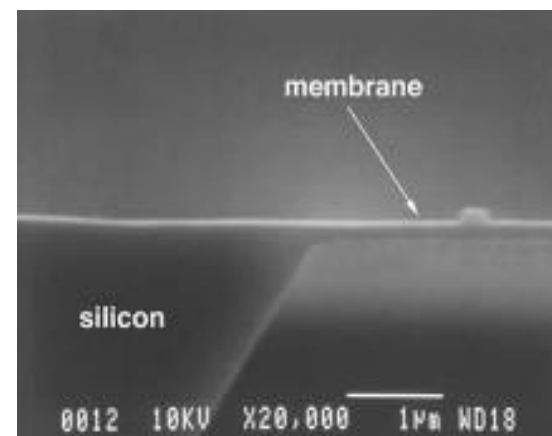
Сензорът е мостова схема от четири пиезокристалала, монтирани върху силициева мембрана. Под въздействие на налягането тя се огъва пропорционално на големината му, което променя напрежението на пиезокристалите и напрежението в единия диагонал на моста, свързан към входа на MEMS ИС.



мембрана



Si_3N_4



Сензори за въздушните възглавници.



Съществуват два типа сензори в зависимост от принципа на действие и съответно конструкцията – механични и електронни с пиезокристал.

Сензори за предпазни колани.

Механичен ключ, рийд контакт или безконтактен, например елемент на Хол.

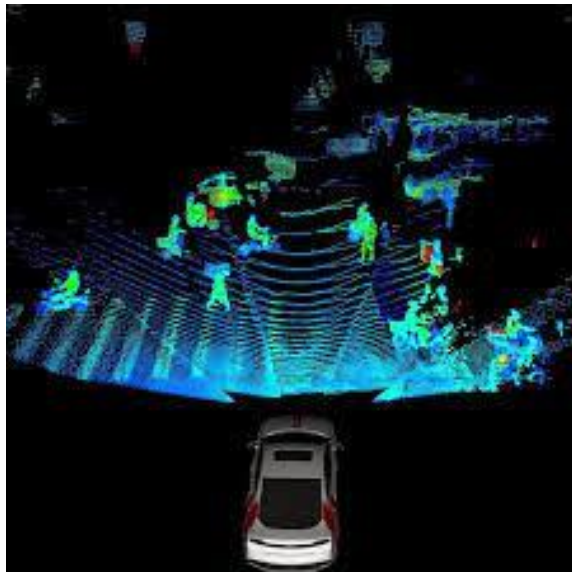
Сензори за паркиране.

Излъчване на ултразвук или електромагнитна вълна и приемане на отразената от автомобила/обекта, пред/зад който се паркира.



Ультразвукови

Sensor Optional



Електромагнитни
LIDAR - laser imaging, detection, and ranging
IR LIDAR

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!