

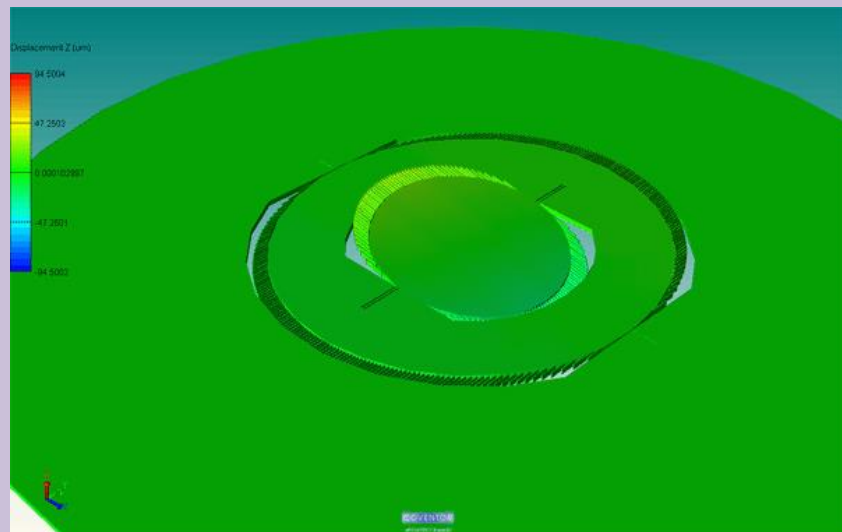
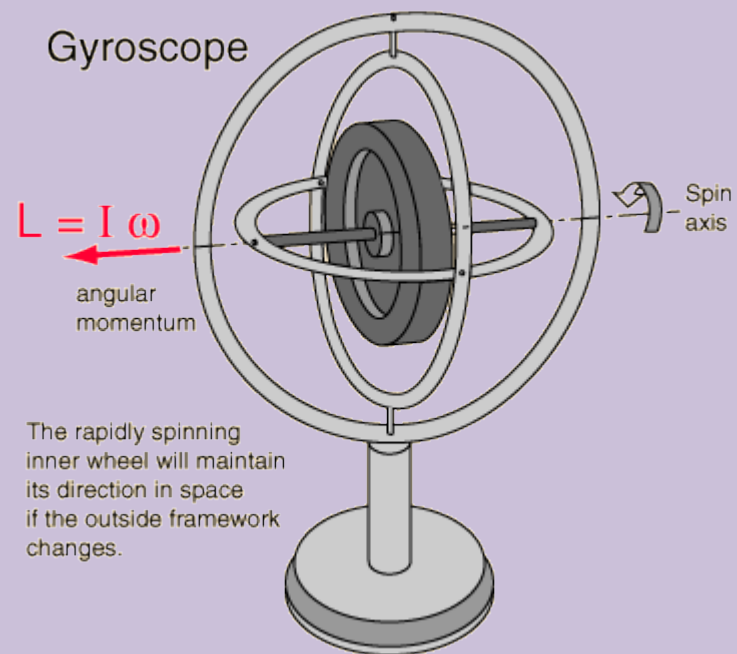


11.0 MEMS жirosкопи

Проф. д-р Тодор Тодоров

tst@tu-sofia.bg

Gyroscope



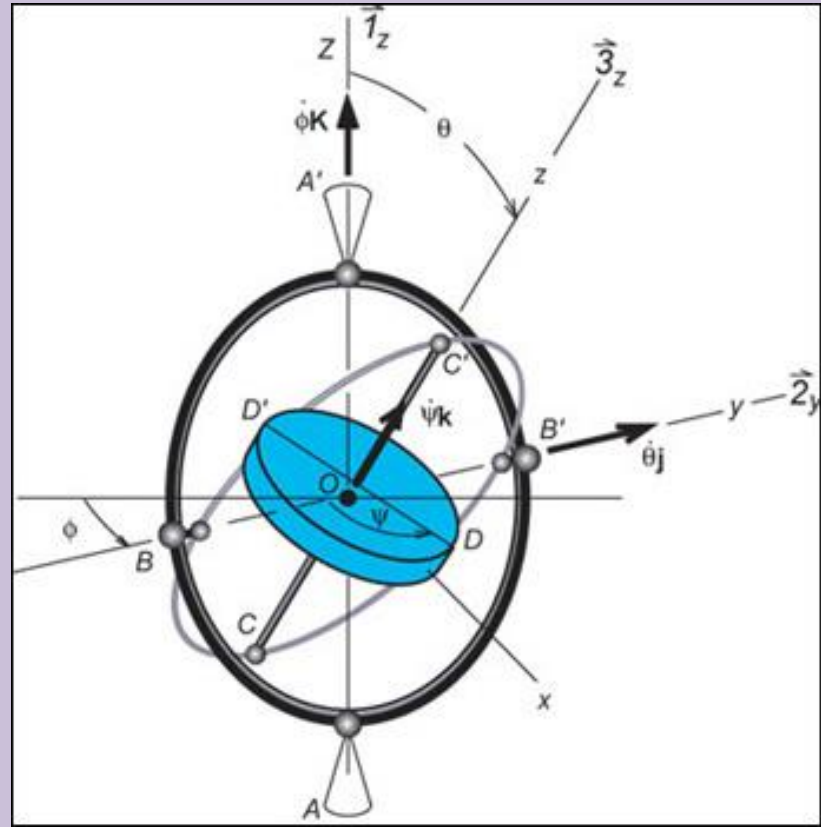
Съдържание

- Класически жироскоп
- Жироскоп
- Вибрационни микрожироскопи
- Вибрационни пръстеновидни жироскопи
- ПАВ (SAW) микрожироскопи
- Жироскопи с влакнеста оптика
- Лазерни жироскопи

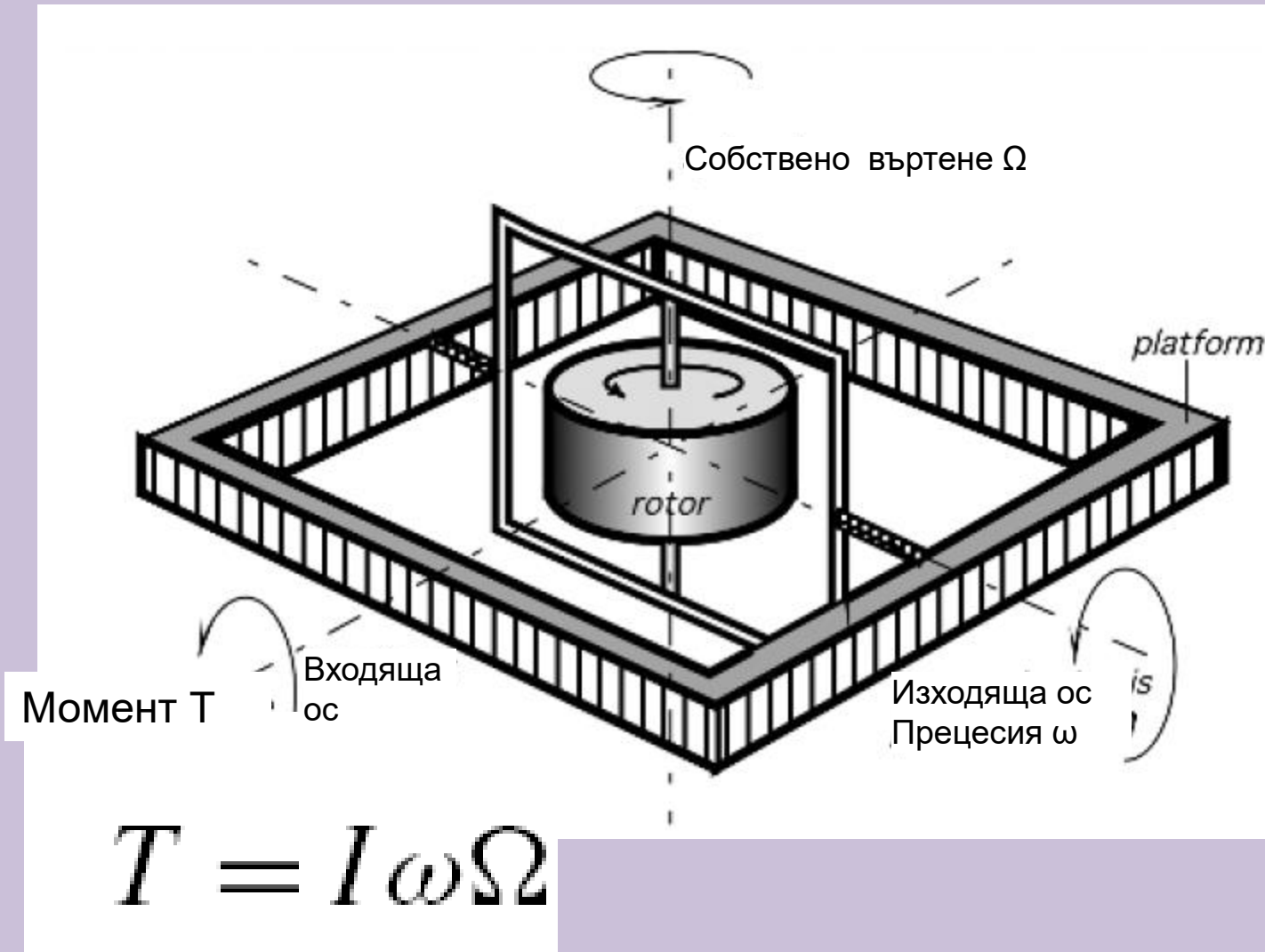
Класически жирокоп – твърдо симетрично тяло, въртящо се около една неподвижна точка.

Ако сумата от моментите на всички сили спрямо неподвижната точка е нула, жирокопът се нарича уравновесен, запазва постоянно направлението си в пространството.

Ако в точка от оста на бързо въртящ се жирокоп се приложи сила, то оста на жирокопа ще се отклони по направление на момента на силата спрямо неподвижната точка. Движението на оста му е безинерционно – с премахване на натоварването движението спира.



Жироскоп с една степен на свобода (жирометър)



$I \Omega = \text{const}$

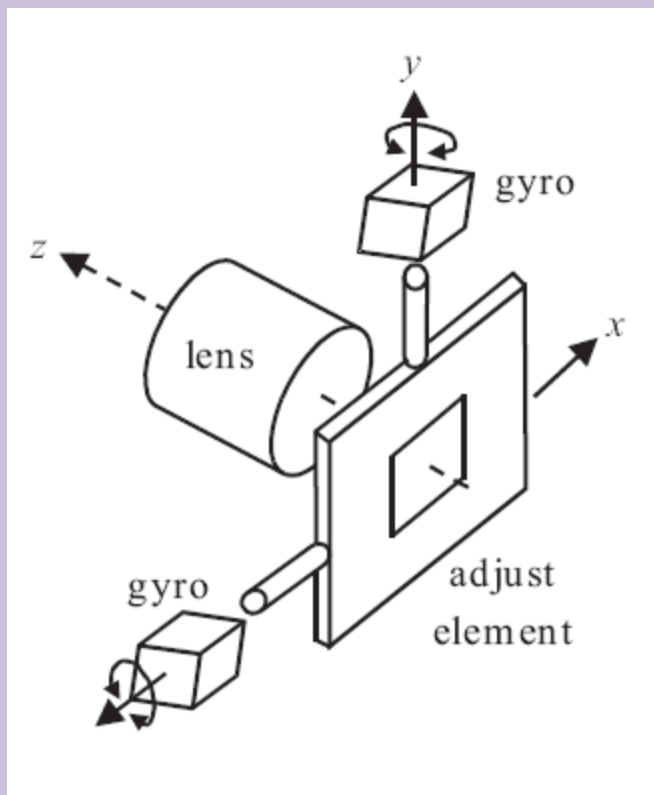
Приложение - за измерване на момент или ъглова скорост.

Приложение на макро жирокопите
за навигация и стабилизиране движението
на големи плавателни съдове, самолети,
ракети, космически кораби, оптични уреди и
оръжейни системи.

Недостатъци:

- сложна конструкция,
- голяма маса
- голяма консумация на енергия,
- трудно се миниатюризира.

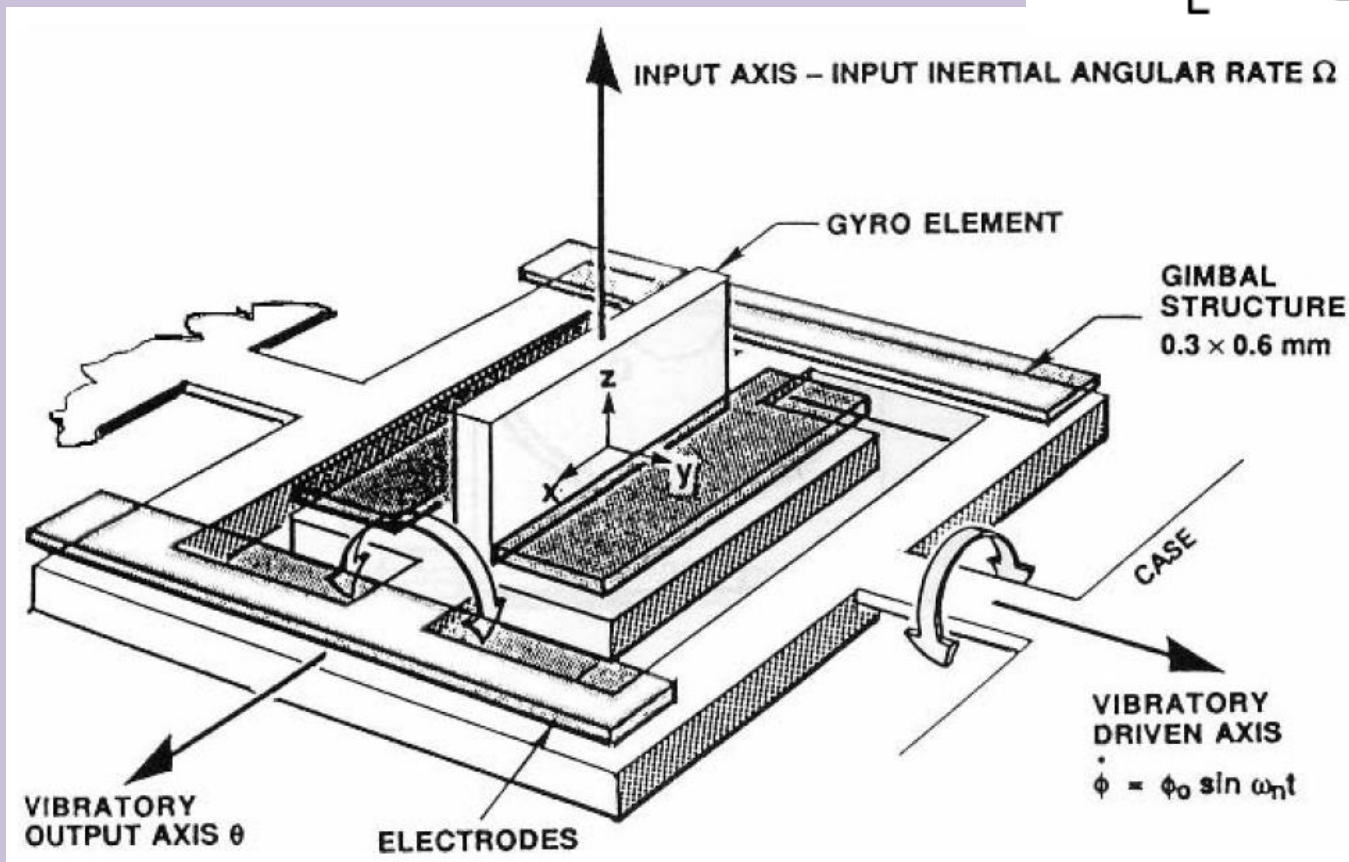
Приложение на макро-жироскоп в оптични уреди за поддържане на постоянна посока



Ако стабилността на образа е най-важния приоритет, най-доброто решение е да се използва жироскоп с бързо въртящ се ротор. Камерата ще поддържа направлението и трудно се отмества. Ако се налага бърза смяна на посоката е трудно да се премести камерата. Жироскопът не може да се спре веднага, поради което стабилизатор с жироскоп се прилага само в някои специални случаи.

Първи пример на силициева микро-изработка на куплиран резонансен жиромерът.

$$\Theta = \left[\frac{I_x + I_y - I_z}{I_x} \right] \frac{\phi_0 \Omega Q}{\omega_n}$$



Производител Draper Laboratory 1990 г. Външната карданна рамка се задвижва електростатично с постоянна амплитуда, а чрез сензор се отчита движението на вътрешната рамка. Резолуцията на ъгловата скорост е само 4 deg s^{-1} и честотния диапазон е 1 Hz.

Микрожироскоп е устройство, което измерва ъглова скорост или ъгъл на ротация около ос. Почти всички създадени досега MEMS жироскопи използват вибриращи механични елементи, за да сензорират ротация. Те не съдържат въртящи се части, които изискват лагери, поради което могат лесно да се минитюаризират и произвеждат серийно чрез микро-механични технологии. Всички вибриращи жироскопи са базирани на пренос на енергия между два вибриращи режима на структура предизвикани от кориолисиво ускорение. Кориолисовото ускорение е наречено на френския учен и инженер Gaspard G. de Coriolis (1792–1843).

Приложения на микрожироскопите:

- Битова електроника – **стабилизиране** на картината в (3D) пойнтери , камери, геостационарни позициониращи системи (GPS), мобилни телефони, игри .
- Индустриални продукти – роботи, **управление** на машини, **навигация** на превозни средства.
- Медицина – въртящи се столове, хирургични инструменти.
- Военни приложения – интелигентни амуниции, управляеми ракети и оръжейни системи.



Sandia's self-guided bullet prototype can hit target a mile



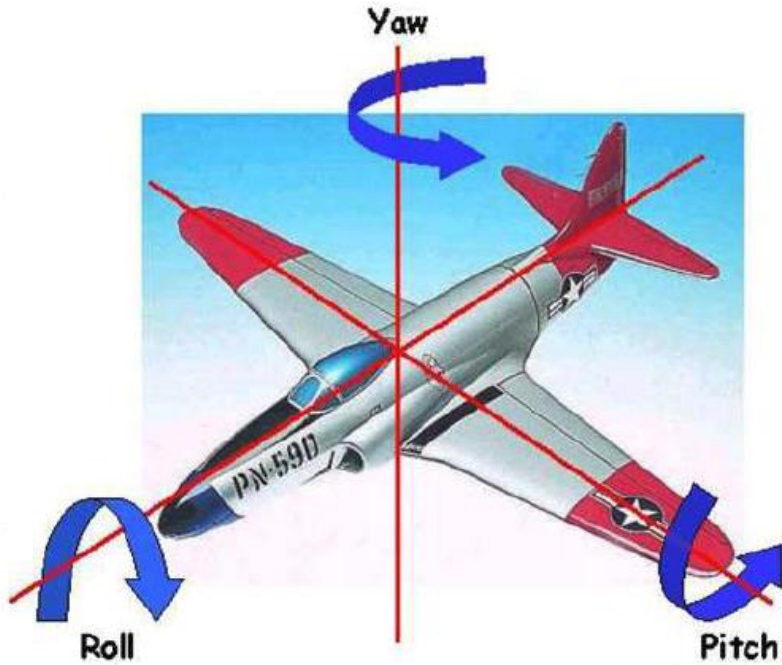
Sensor Type: Gyroscope

- MEMS gyroscopes are used for measuring angular rate

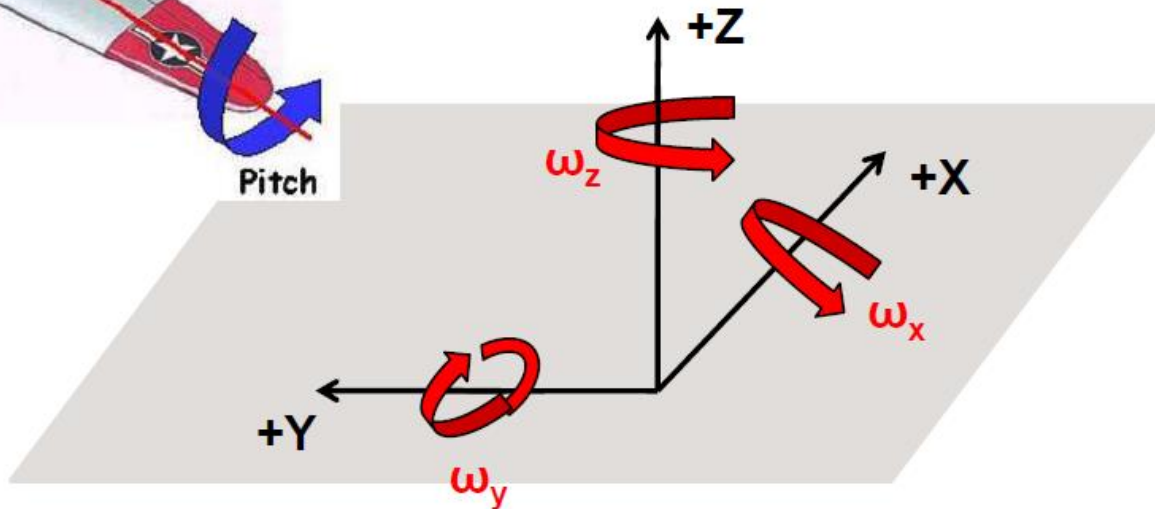
The aircraft
ROLLS
around
the longitudinal
or fuselage axis.

The aircraft
PITCHES
around
the lateral or
wing axis.

The aircraft
YAWS
around
the vertical axis.



Earth rotation: 0.004°/s



Приложение

Управление и навигация

- **Сегуей скутер**

- Използва 5 MEMS жирокопа за детекция на наклон и ротация.



Хувърборд



Вибрационен резонансен микрожироскоп

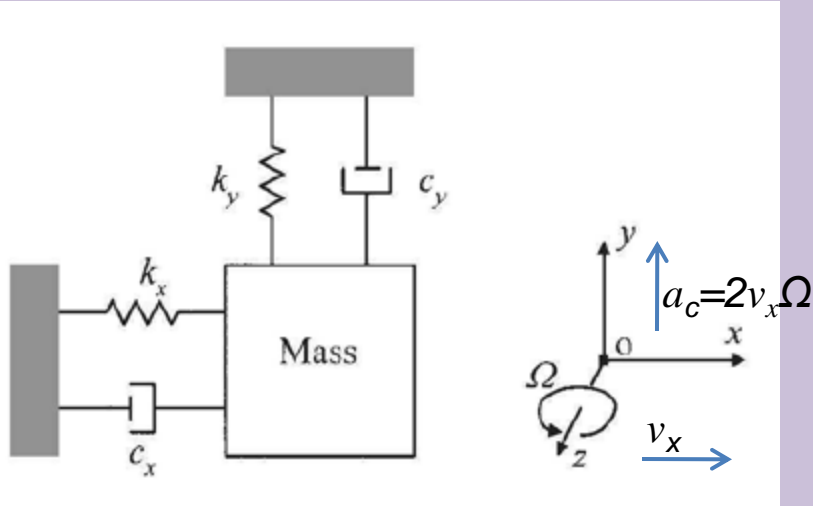
Принцип на действие

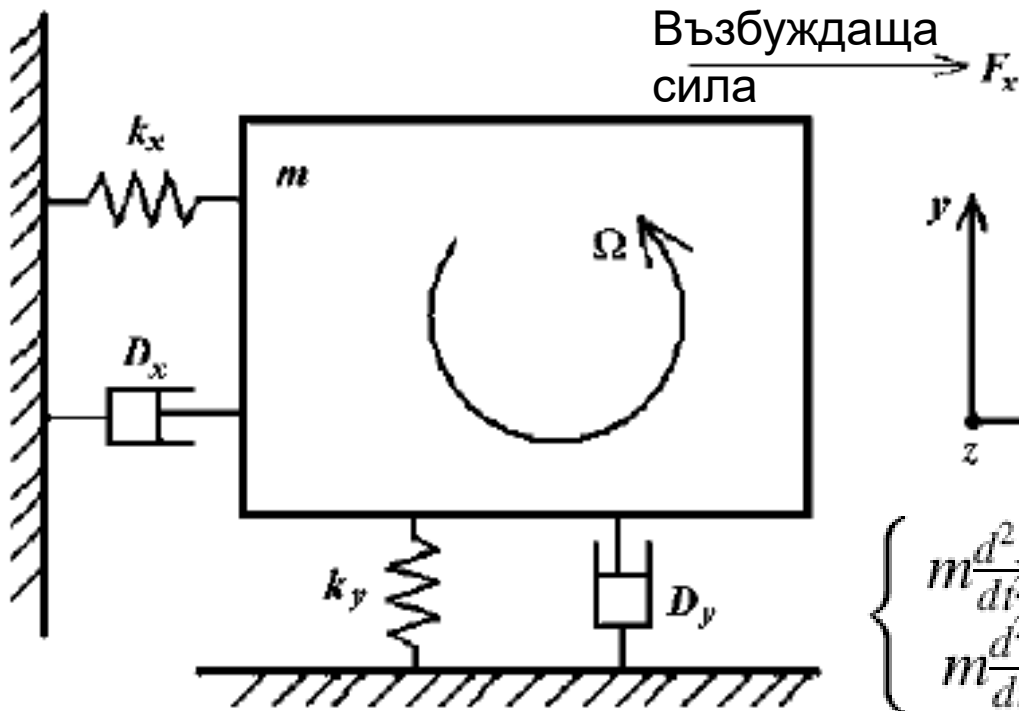
Двудимензионна вибрационна система с два ортогонални вибрационни режима. Единият вибрационен режим съответства на движението на масата по ос x и има собствена честота ω_x . Другият вибрационен режим е в y направление с честота ω_y .

Обикновено $\omega_x \approx \omega_y$. При работа масата се задвижва вибрационно по ос x с честота ω_d – работна честота, близка до ω_y . Ако се появи ъглова скорост Ω

перпендикулярно на равнината на чертежа, в следствие на двете движения на масата възниква кориолисово ускорение a_c . Това

ускорение е перпендикулярно на оста x . В същото направление, но с обратна посока възниква кориолисова сила $\Phi_c = -ma_c$, която задвижва масата във вертикална посока. Чрез сензор се измерва преместването по y като по този начин се определя ъгловата скорост Ω [4].





$$\vec{F}_c = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega})$$

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + D_x \frac{dx}{dt} + k_x x - 2\Omega m \frac{dy}{dt} = F_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + D_y \frac{dy}{dt} + k_y y + 2\Omega m \frac{dx}{dt} = 0 \end{cases}$$

Обикновено $F_x = a_x \sin \omega_d t$ $\omega_d \approx \omega_x \Rightarrow$

$$x(t) = a_x \sin(\omega_d t) \cong a_x \sin(\omega_x t)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{\omega_y}{Q_y} \frac{d^2 y}{dt^2} + \omega_y^2 y = -2a_x \Omega \omega_x \cos(\omega_x t) \quad \omega_y = \sqrt{k_y/m}$$

$$Q_y = \sqrt{mk_y/D_y}$$

Установеното движение на втория резонатор е

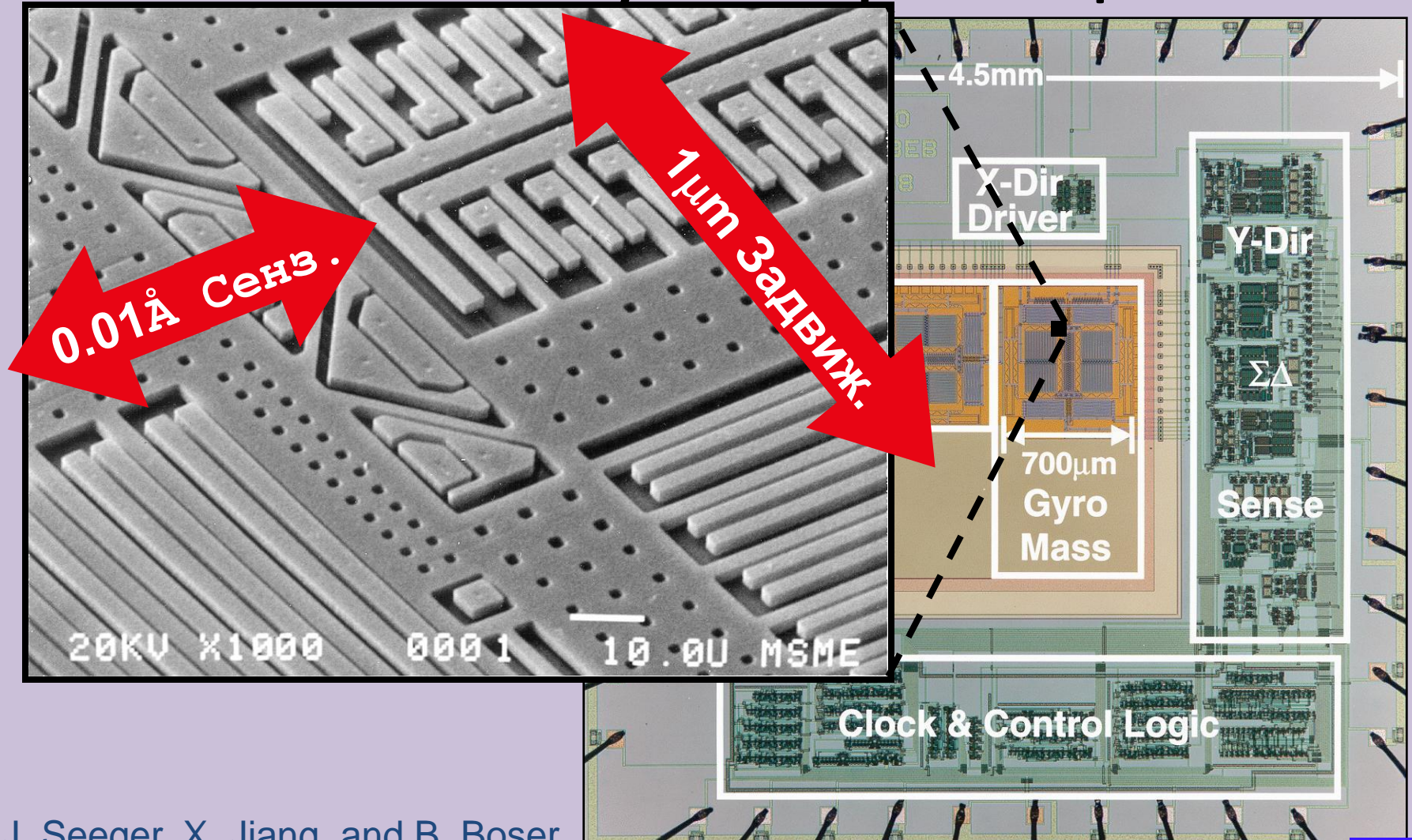
$$y(t) = a_y \cos[\omega_x t + \phi_y]$$

Качествен фактор на втория резонатор

$$a_y = -\frac{2a_x \Omega \omega_x}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \omega_x^2 \omega_y^2 / Q_y^2}}$$

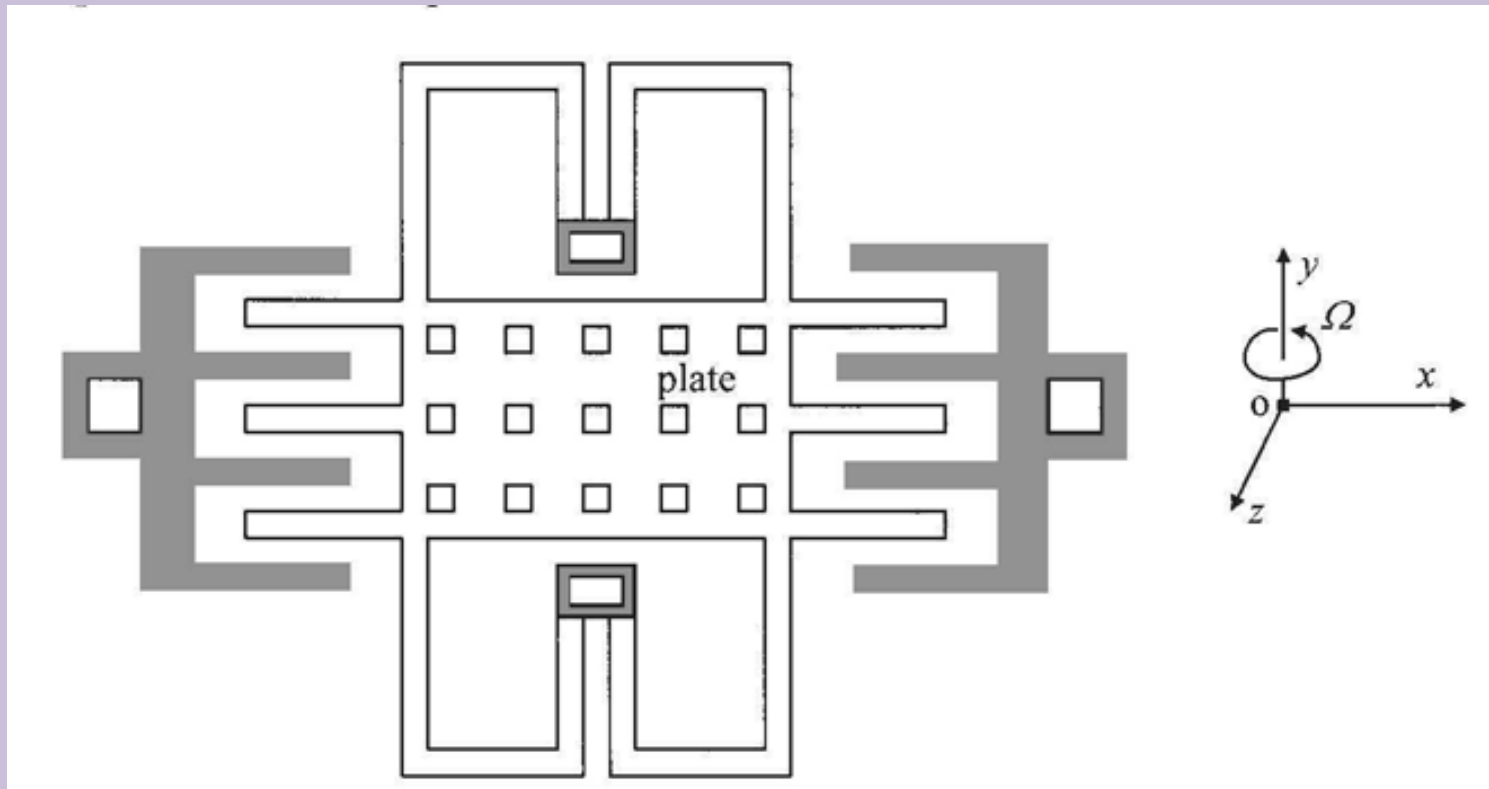
Амплитудата на сензорираната честота е пропорционална на външната ъглова скорост Ω

MEMS Gyroscope Chip



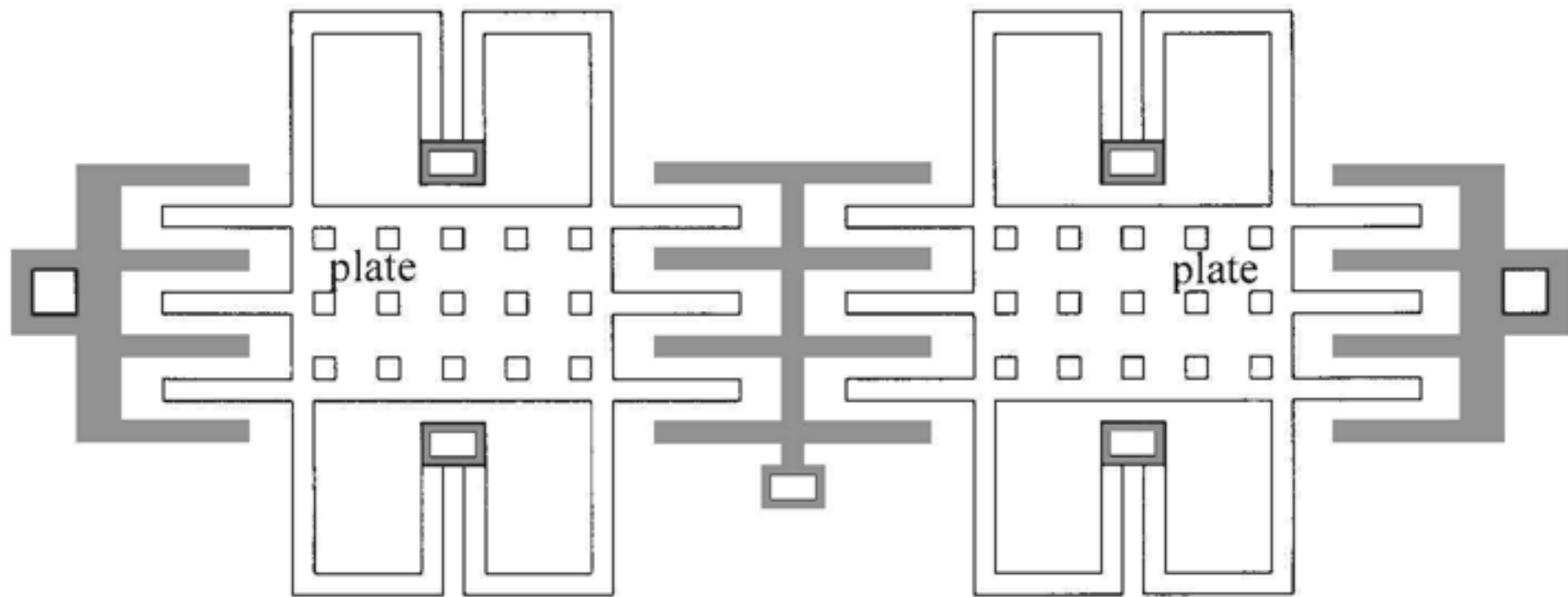
J. Seeger, X. Jiang, and B. Boser

Резонансен жироскоп с гребенно капацитивно задвижване

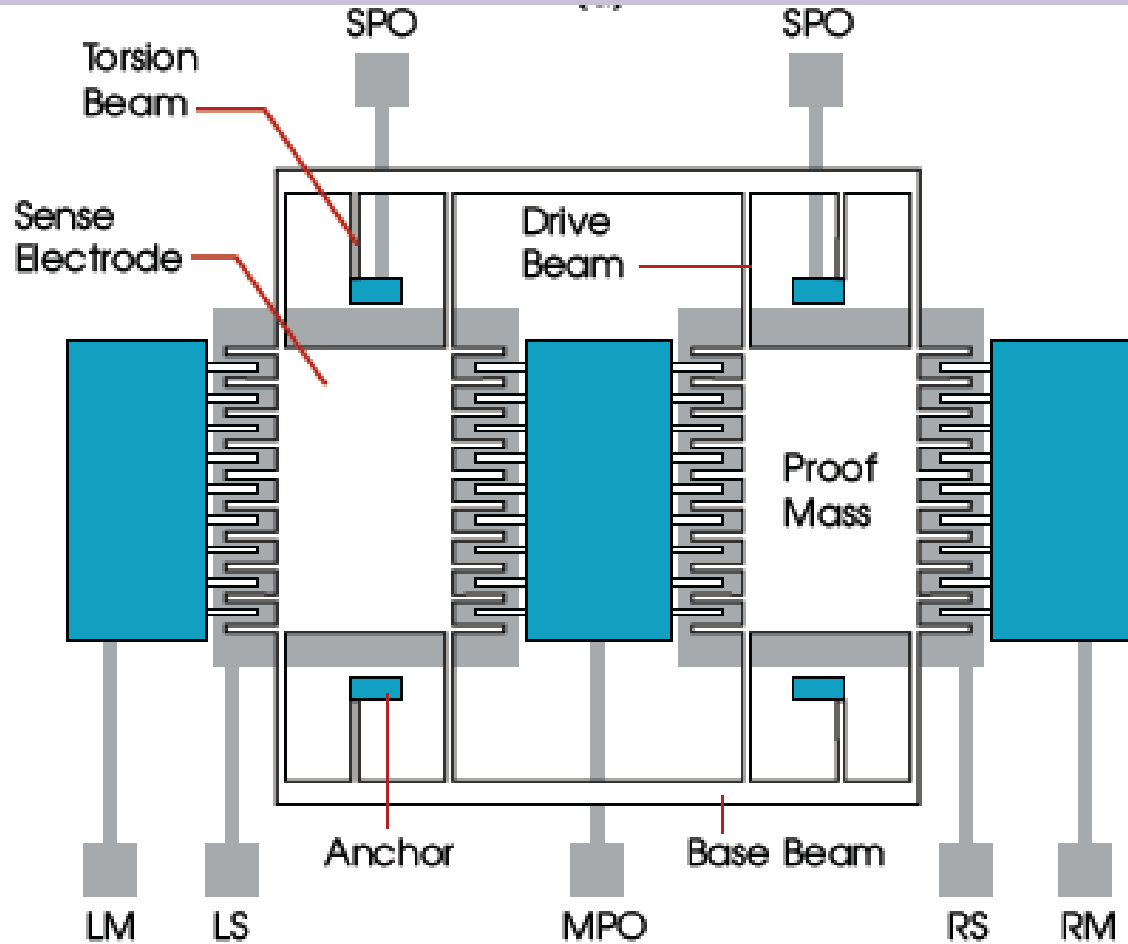


Масата в центъра се задвижва вибрационно в хоризонтална посока чрез два гребенни кондензатора. При възникване на ъглова скорост по вертикалната координата, масата започва да вибрира перпендикулярно на равнината на чертежа. Тези вибрации се отчитат чрез капацитивен сензор, който се образува между подложката и равнината на масата.

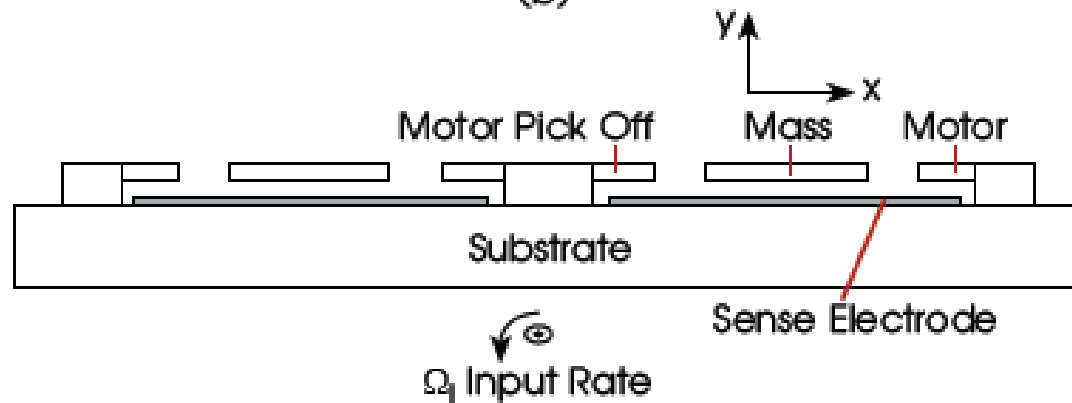
Камертонен микрожироскоп

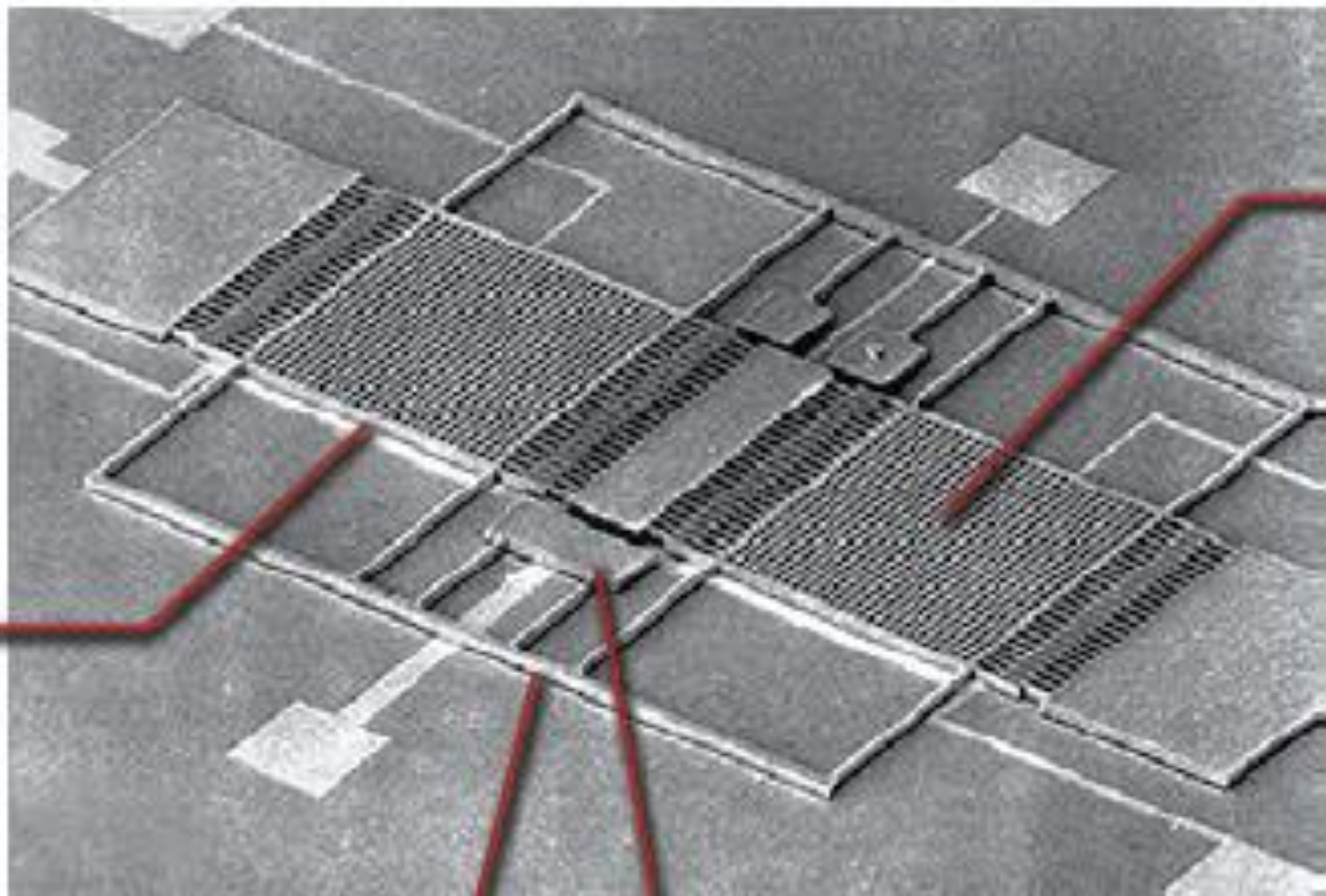


Двете маси се задвижват вибрационно в противофаза. При поява на вертикална ъглова скорост масите започват също да вибрират в противофаза перпендикулярно на чертежа. Противофазните вибрации позволяват да се приложат диференциални схеми за измерване на капацитета, които дават по-силен сигнал и са по-устойчиви на външни механични влияния.



(b)





Proof Mass

Sense Plate

Base Beam

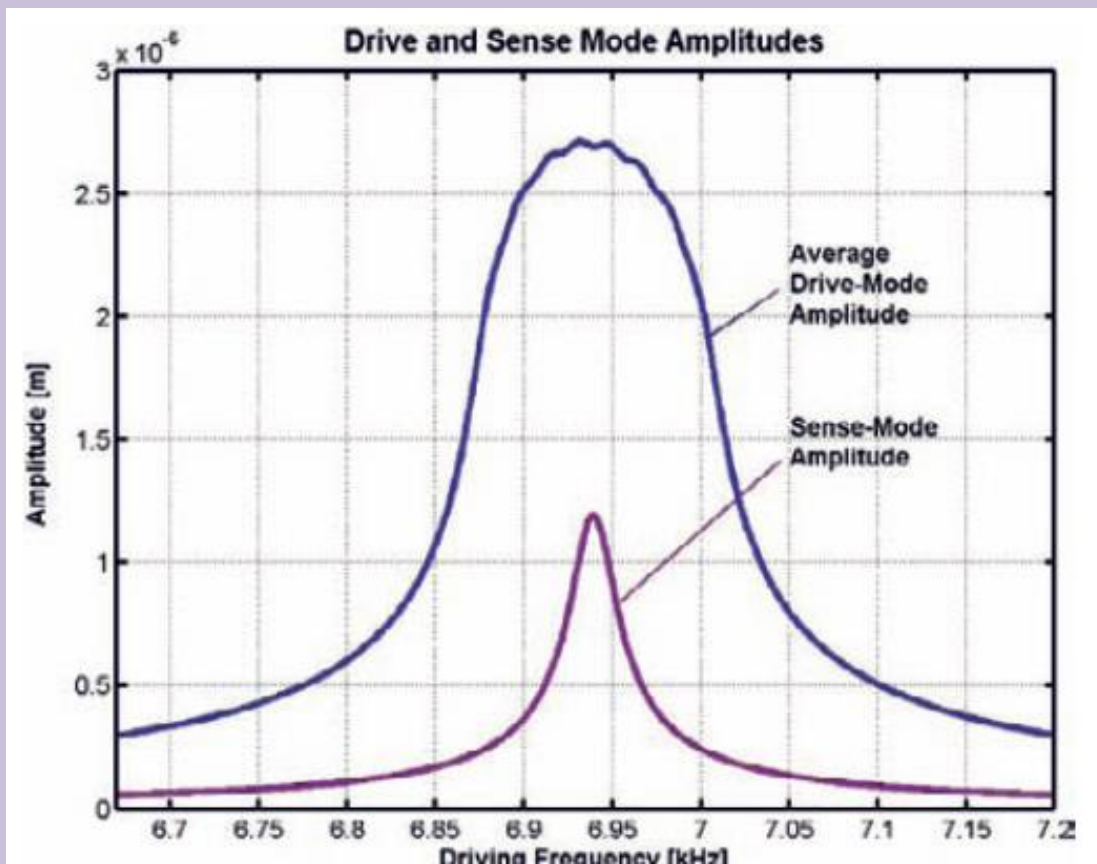
Anchor

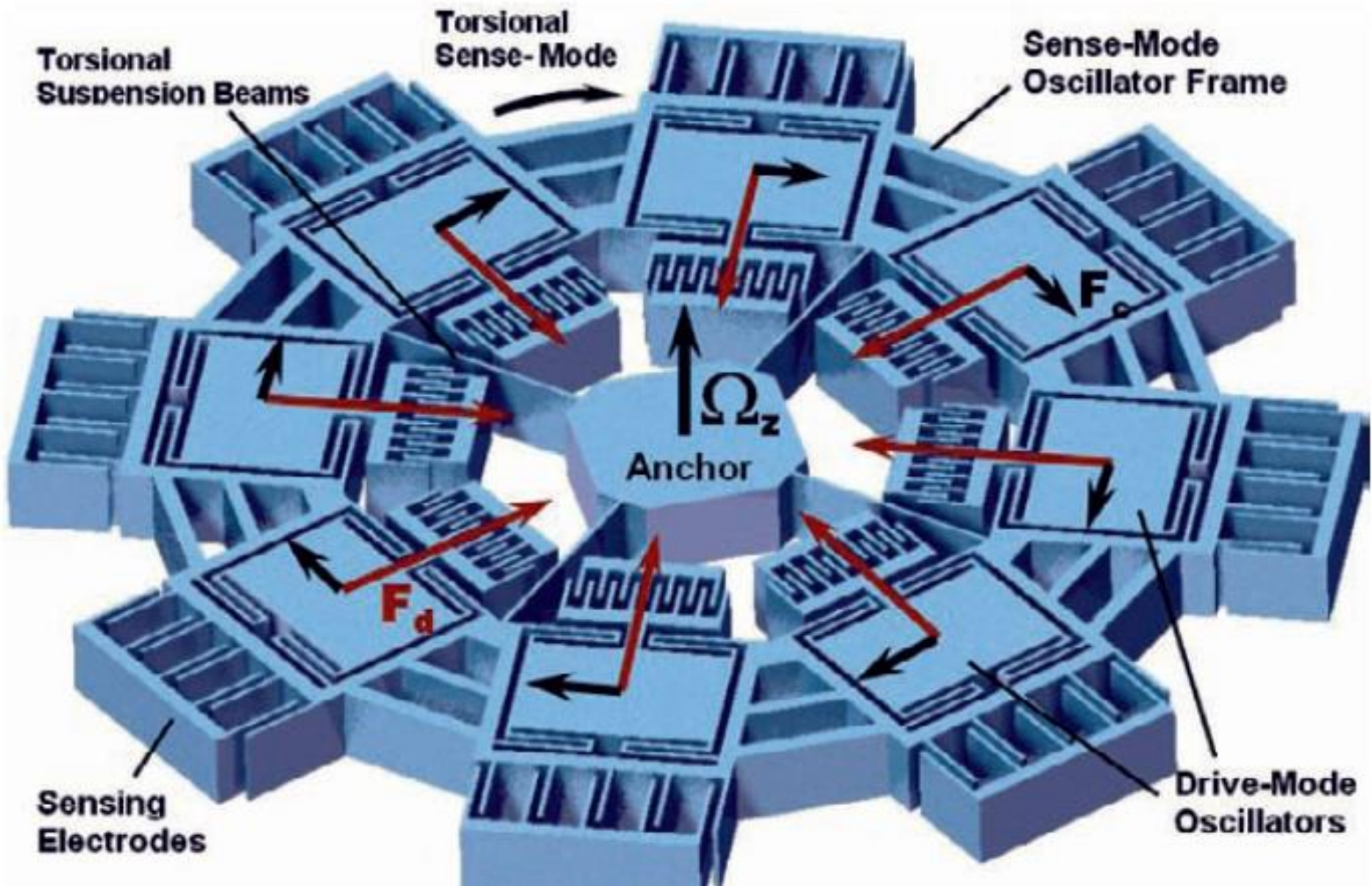
Конструктивни проблеми:

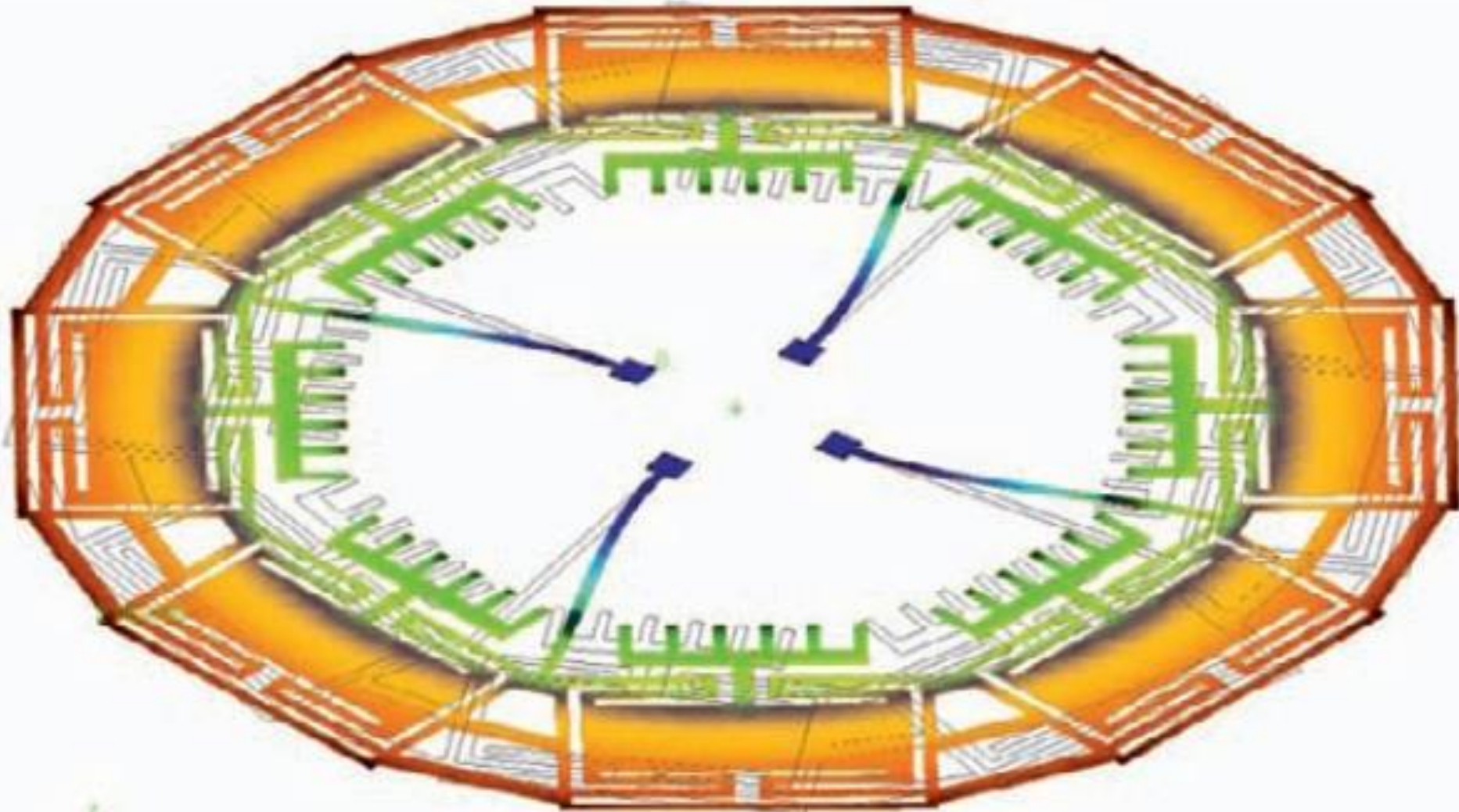
- Кориолисовата сила е слаба, поради което трябва да се използва максимално усилване на вибрациите в резонансен режим;
- Трябва да се вземат специални мерки за отстраняване влиянието на околната среда;
- Чувствителността на отчитането е зависима от брауновото движение;
- Изисква сложна електронна система;

MEMS жироскопи с архитектура тип разпределена маса

Използва се възможността за повишаване на честотния диапазон чрез използване на многократни радиално разположени резонатори с близки резонансни честоти в задвижващия режим. Задвижването и сензорирането са ефективно разделени чрез формиране на мултидирекционен задвижващ режим, който преобразува кориолисовата сила в торзионен момент. Сензорите измерват торзионния момент. Намалява се квадратурната грешка и нулевата грешка на изхода.

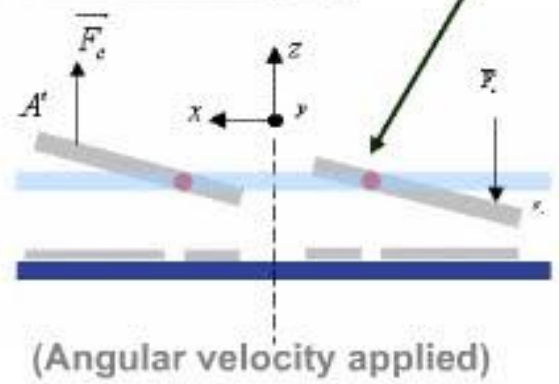
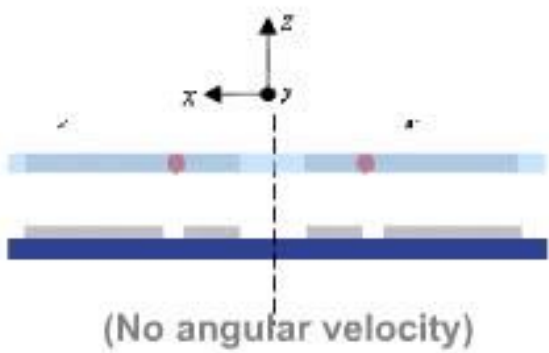
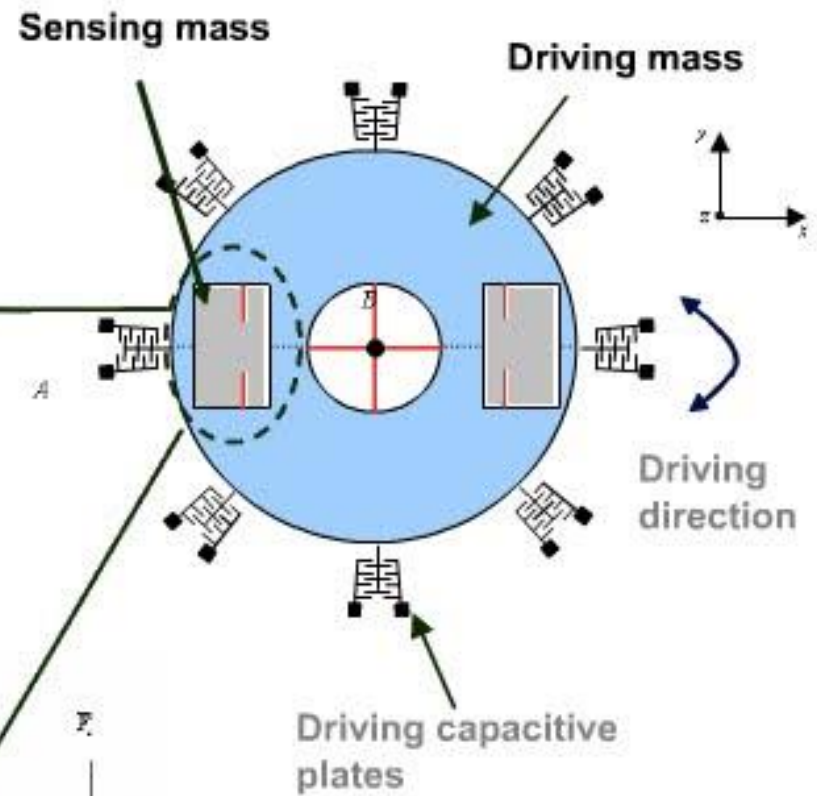
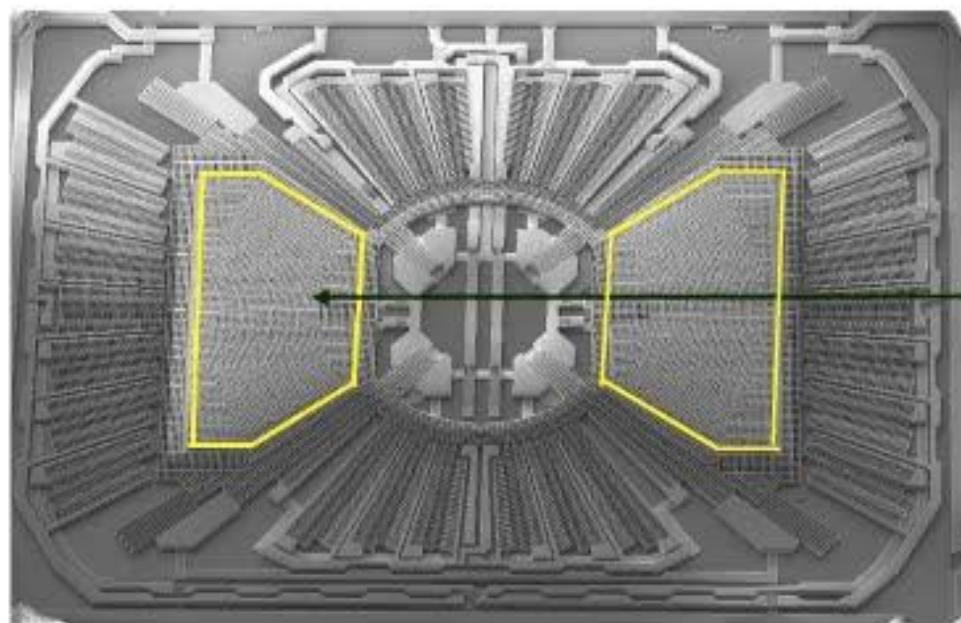






1.

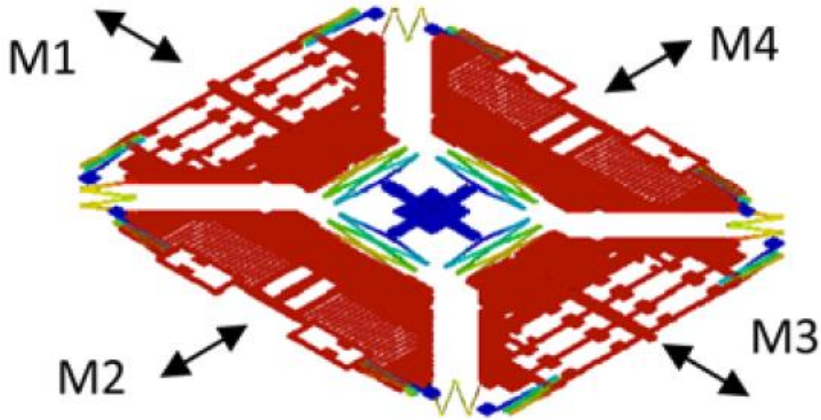
Триосен MEMC жirosкоп (2009 г.)



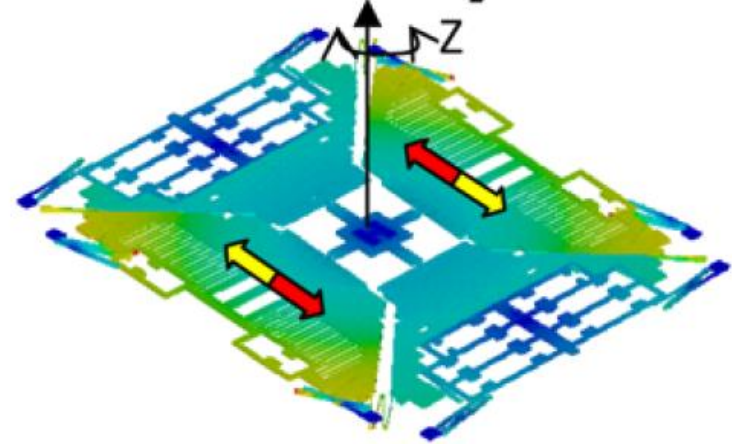
} Capacitance variation due to angular velocity is read by the electronic interface

Single driving mass ST - Microelectronics

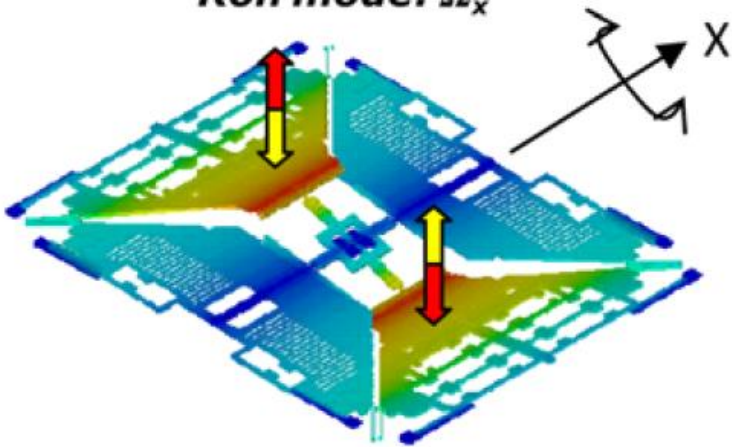
Drive mode



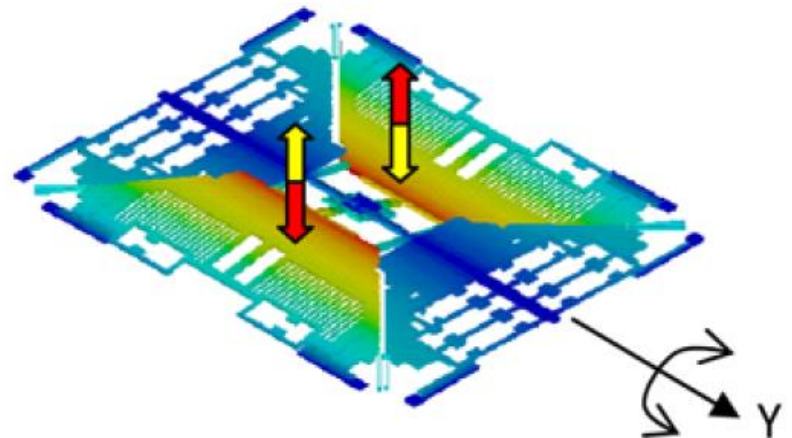
Yaw mode: Ω_z



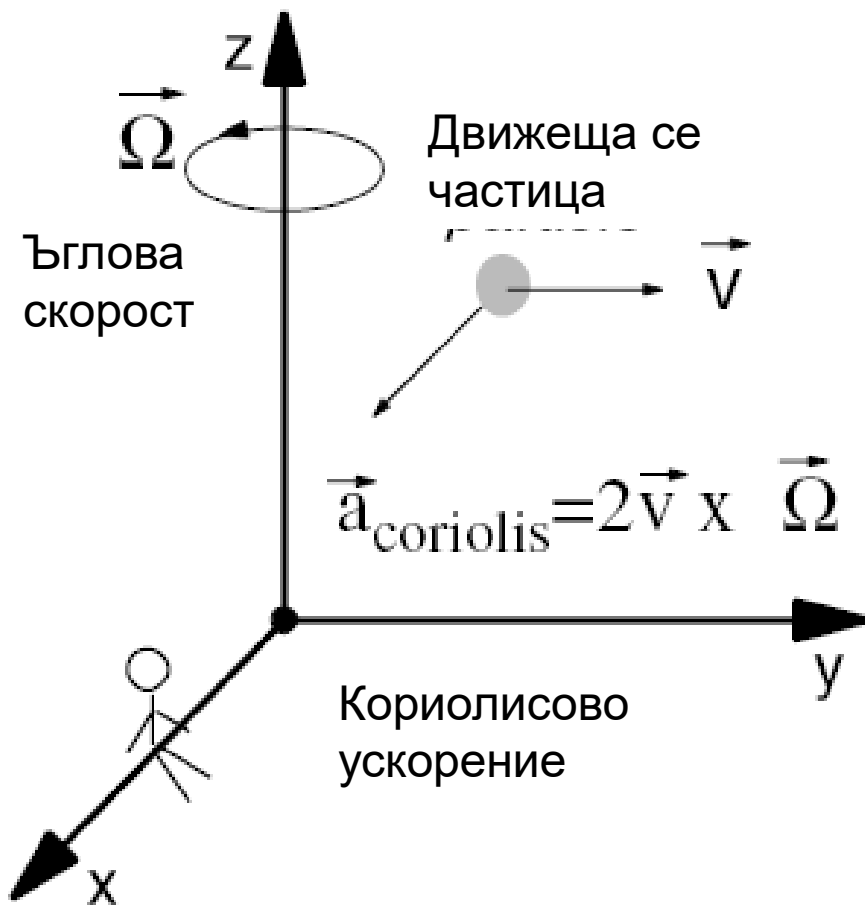
Roll mode: Ω_x



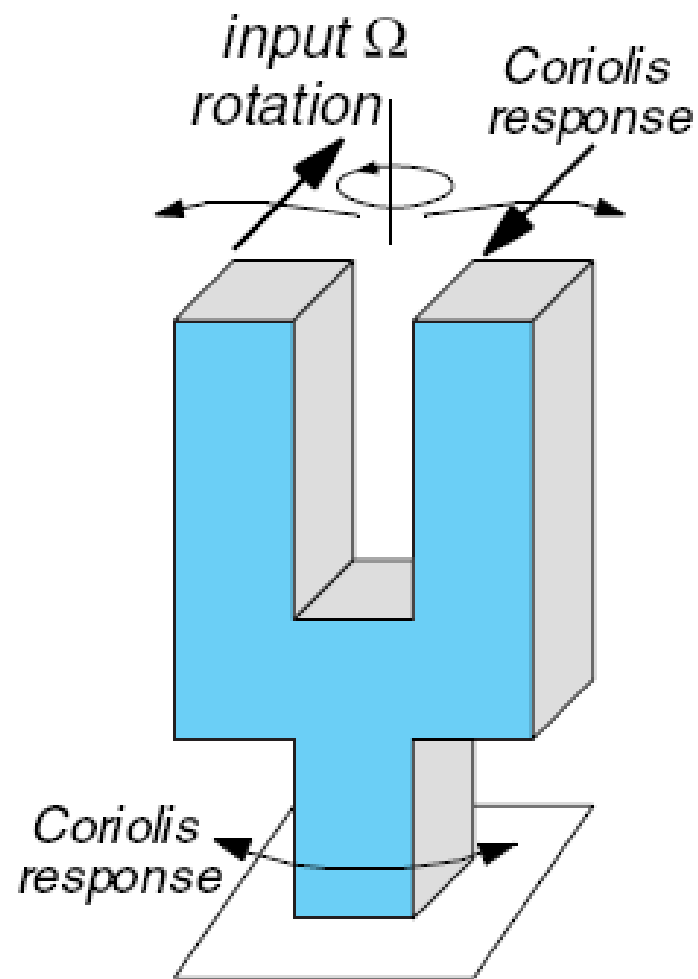
Pitch mode: Ω_y



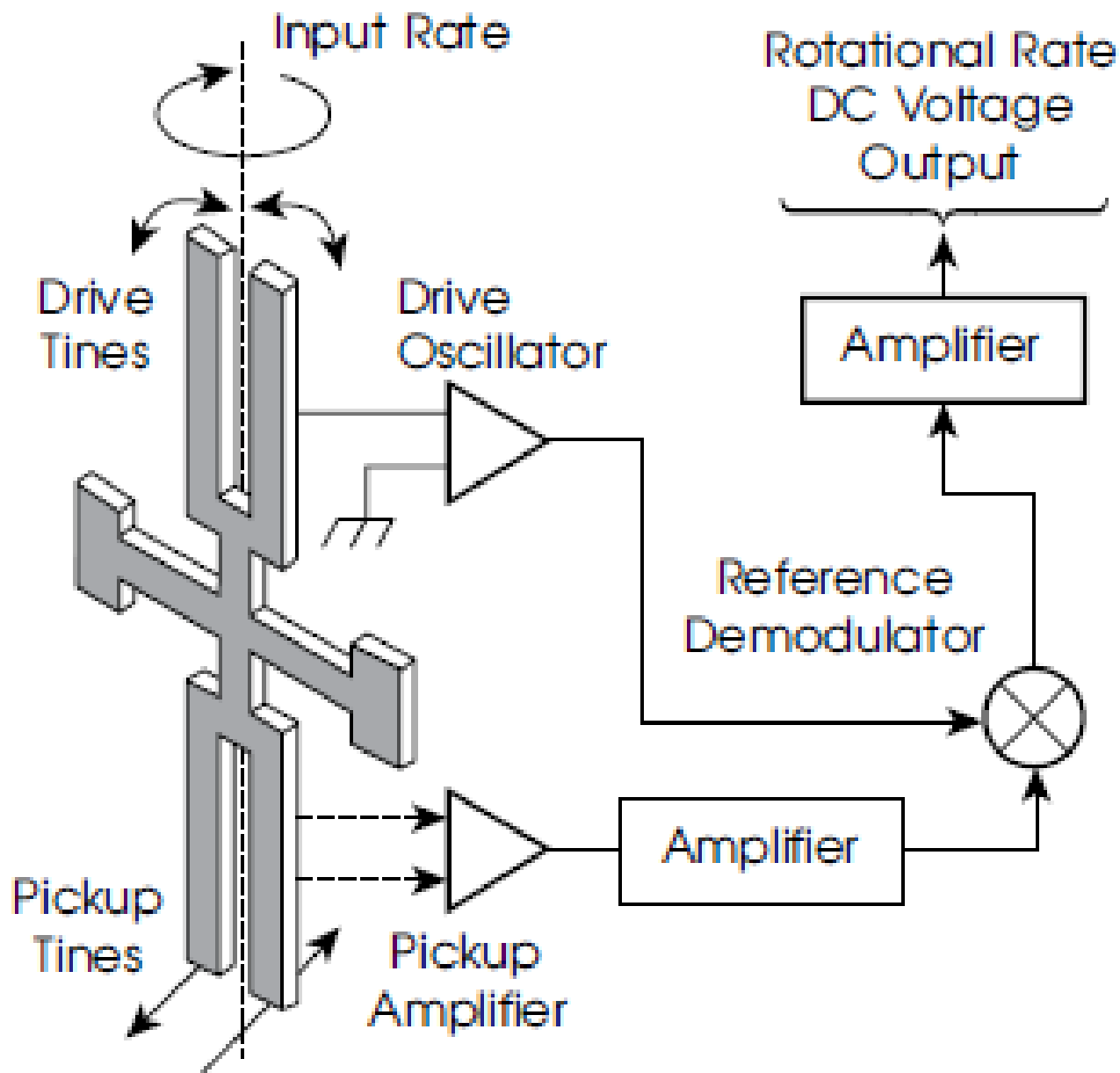
Кориолисов ефект в камертонен вибрационен жirosкоп.



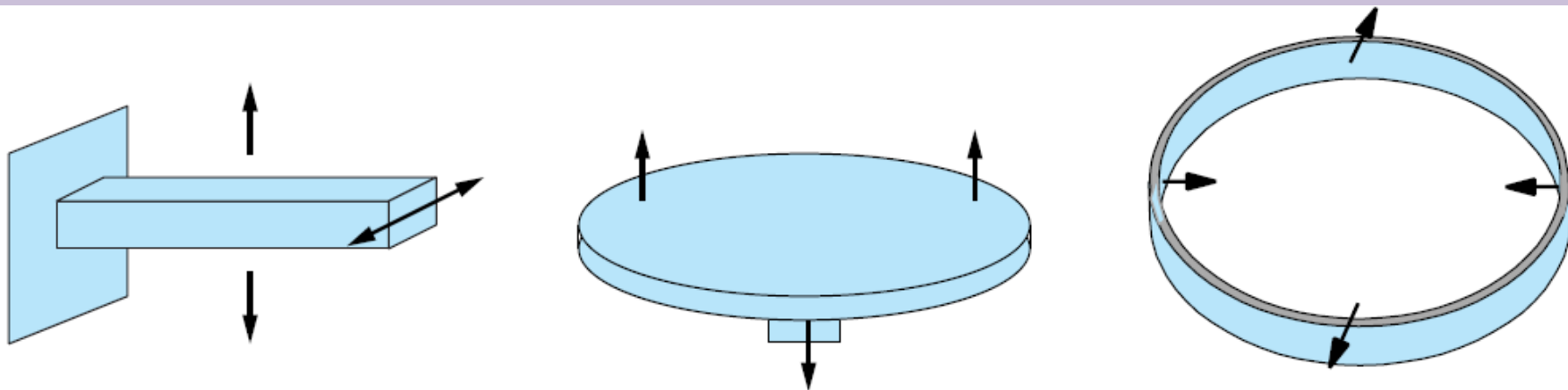
(a)



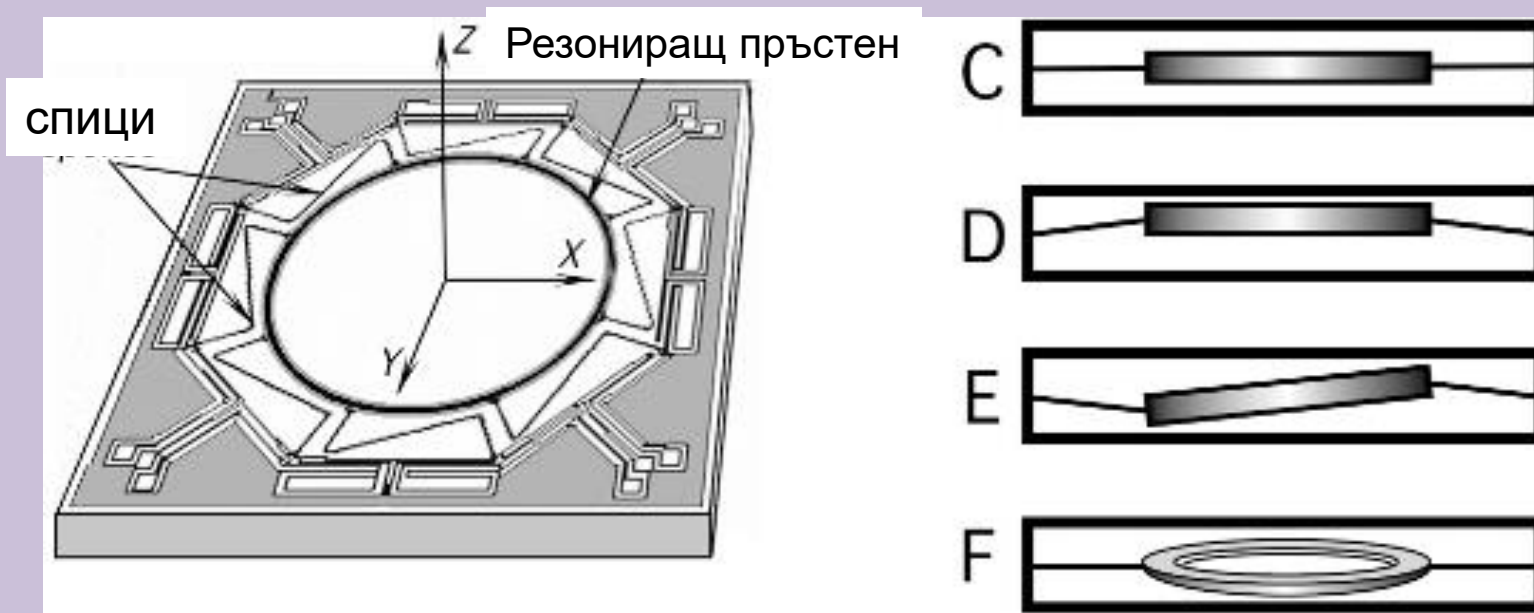
(b)



Вибриращи структури в микрожироскопи



Структура на вибриращ пръстеновиден жirosкоп и форми на вибрации в зависимост от направлението на ъгловата скорост

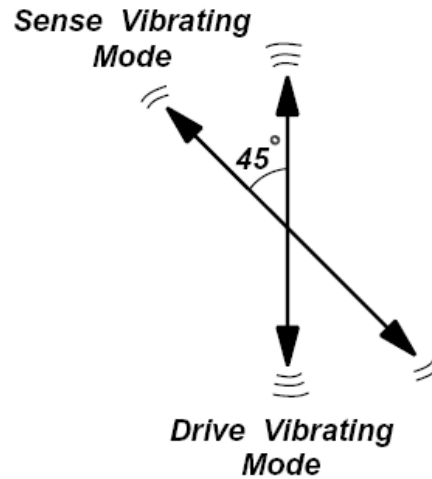
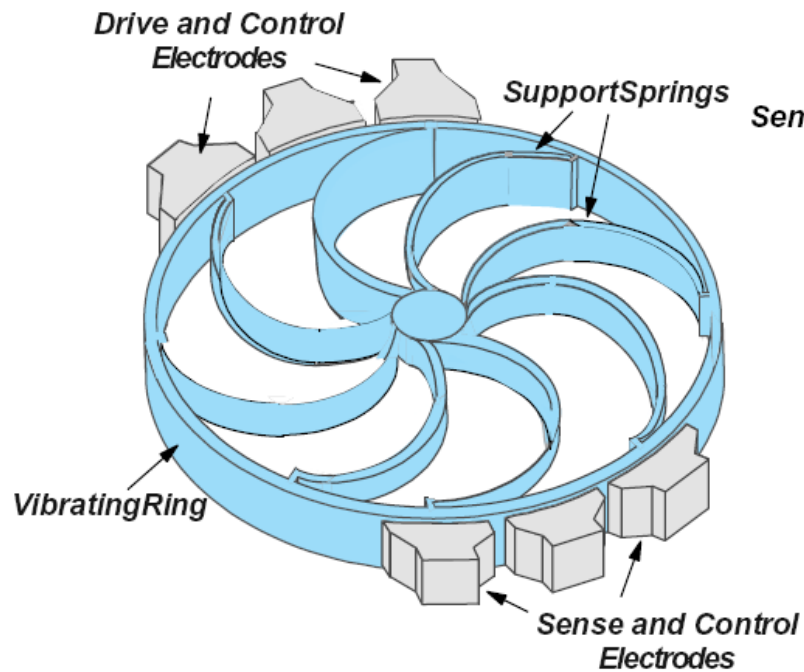


Вибриращ пръстеновиден жироскоп

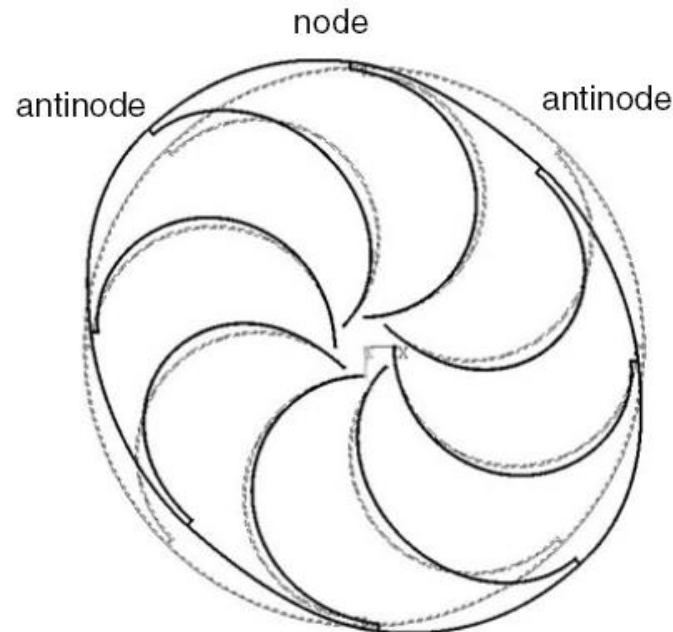
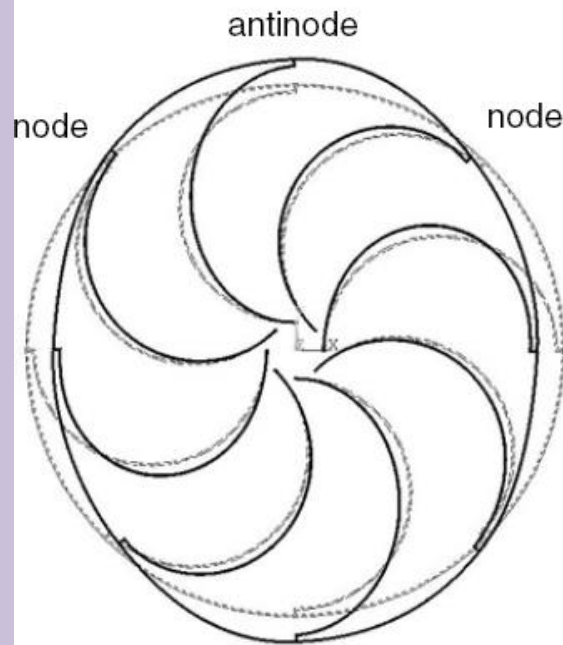
Амплитудата на втората еластична форма или формата на сензориране (q_{sense}), е пропорционална на ъгловата скорост около нормалната ос и се дава чрез

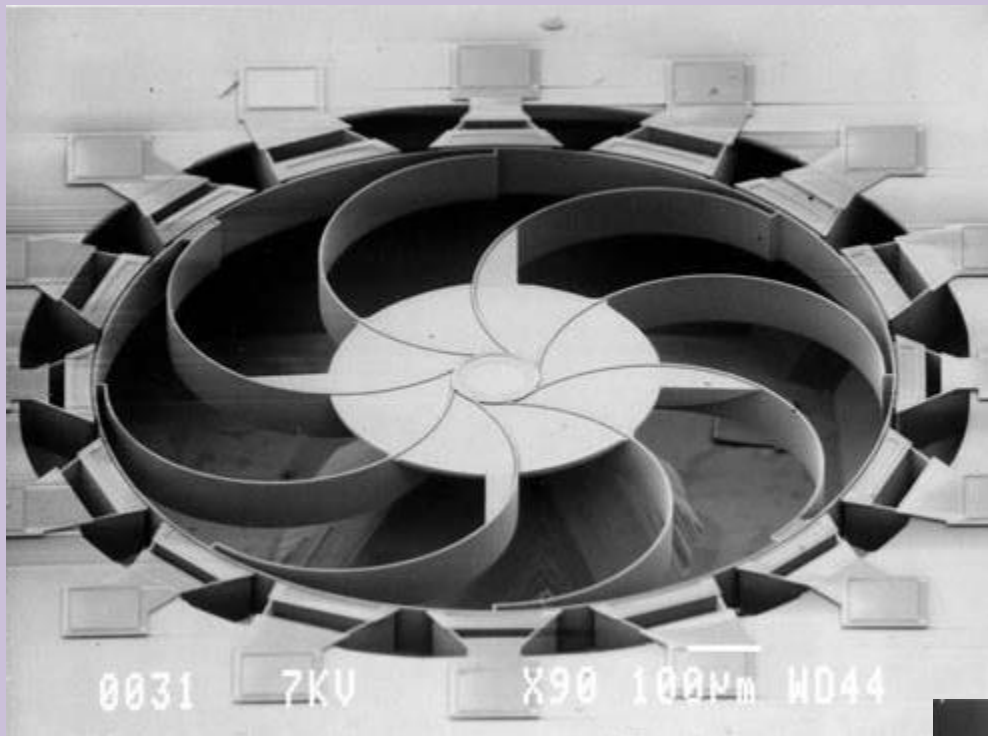
$$q_{sense} = 4A_g \cdot \frac{Q}{\omega_0} \cdot q_{drive} \cdot \Omega_z$$

Където A_g е константа зависеща от геометрията на сензора и е много стабилна по отношение на температура и продължителност на работа на устройството. Q качествения фактор на механичната структура, ω_0 е ъгловата резонансна честота на пръстена, q_{drive} е вибрационната амплитуда на първата еластична форма (задвижващата форма) и ω_z е ъгловата скорост около нормалната ос.



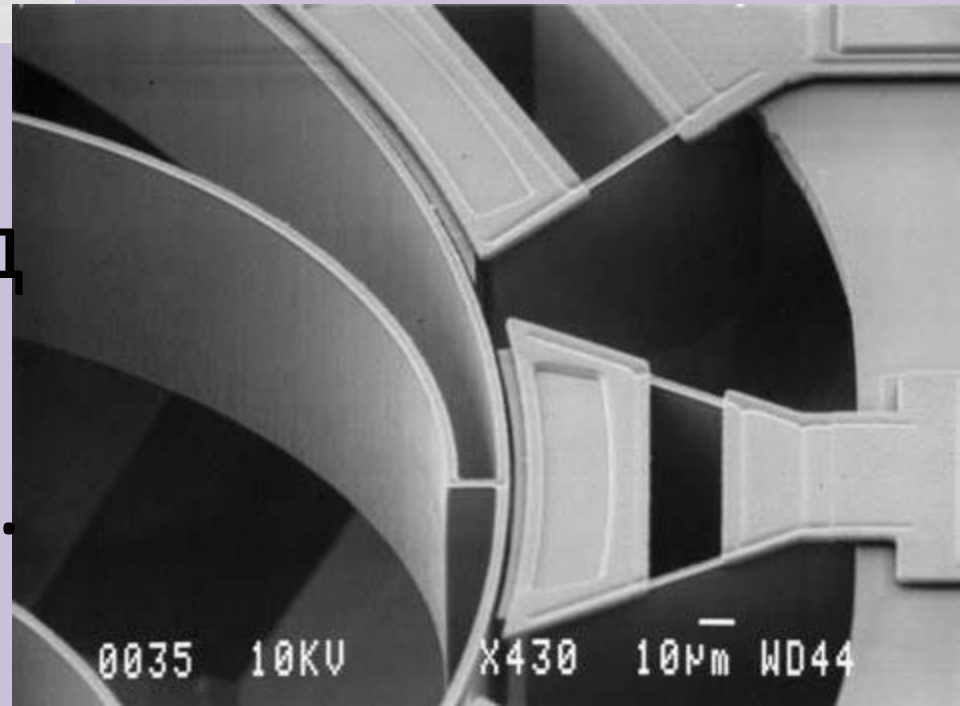
Структура на вибриращ пръстеновиден жirosкоп (а) Еластични форми на вибрации използвани за работа . (b) първа еластична форма (c) втора еластична форма ориентирана на 45 спрямо първата форма с идентична честота.



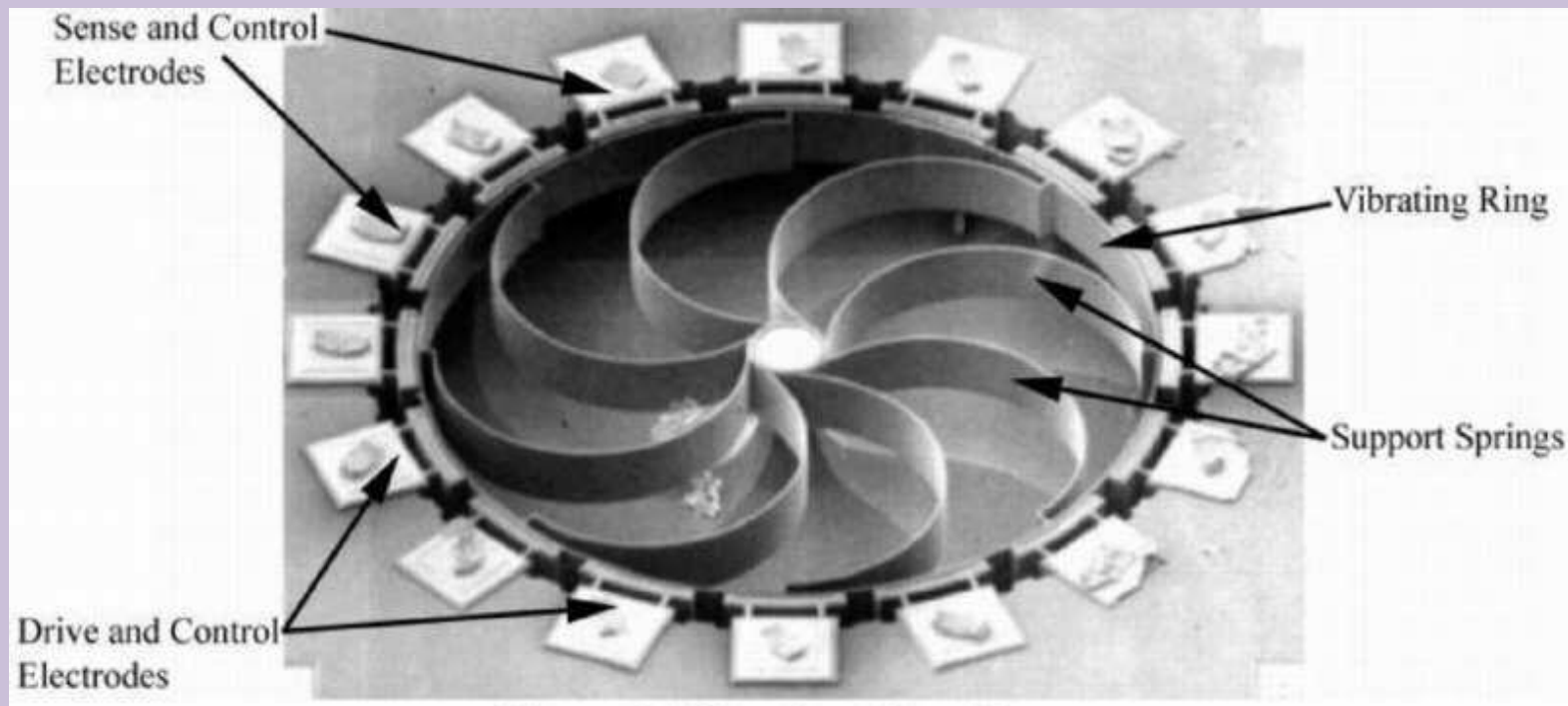


Снимка от СЕМ на 80 μm дебел и диаметър 1mm изработен от полисилиций пръстеновиден жirosкоп

Увеличен изглед на сензорния електрод с въздушна междина от 1.2 μm .



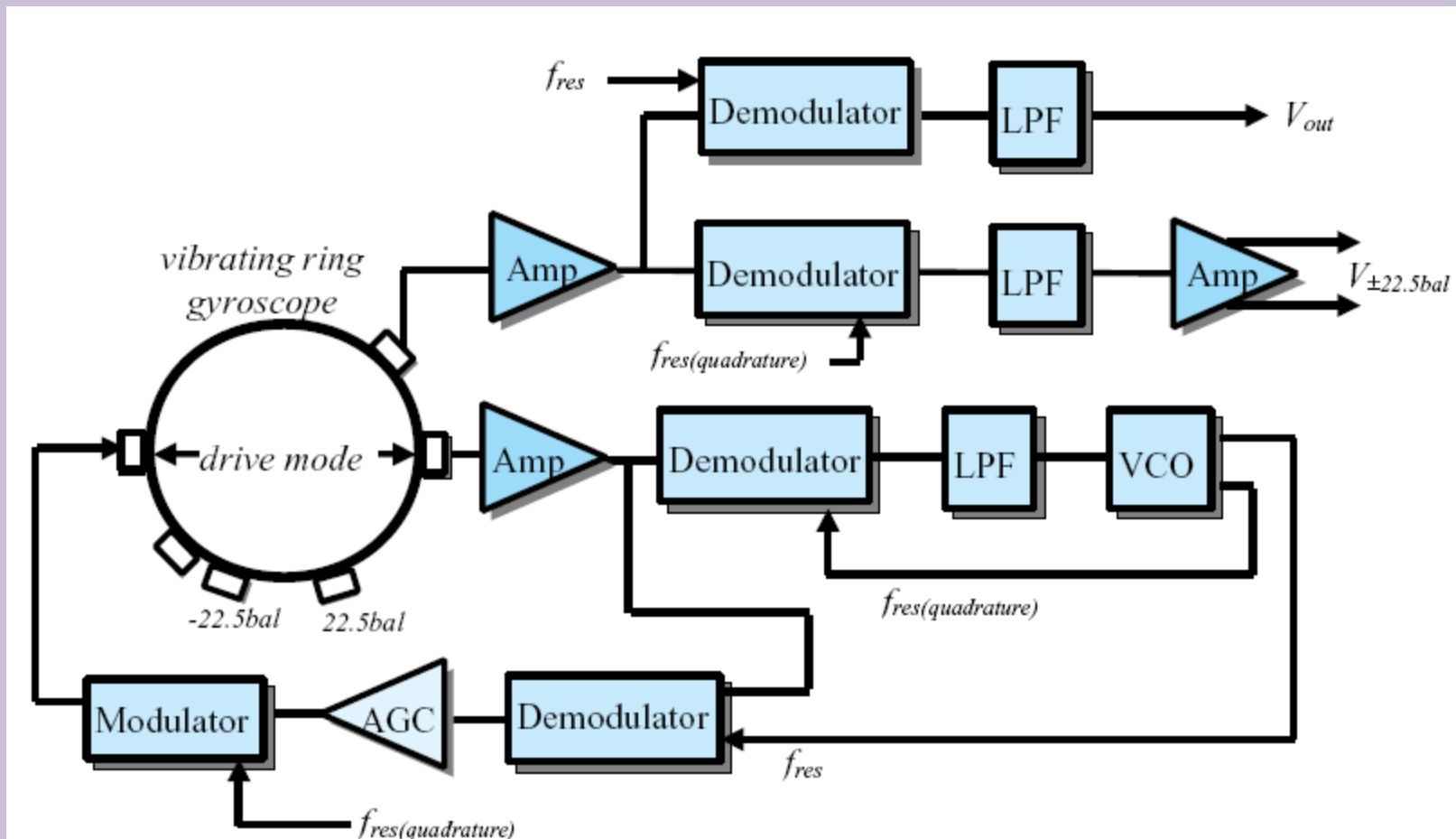
HARPSS вибриращ пръстеновиден жироскоп



- High Aspect-Ratio Combined Poly and Single-Crystal Silicon.
- Разработен е в The University of Michigan.
- Има вибриращ пръстен и 8 поддържащи пружини.
- Всяка пружина е към два електрода за задвижване и сензорирание за да се компенсира асиметрията.
- HARPSS има висока резолюция, нисък шум при нулев сигнал и висока термична устойчивост.

HARPSS Gyroscope

- Предимства:
 - Малка междина между пръстена и електрода
 - Голяма структурна височина
 - Добър структурен материал
- Чувствителност ~ 200 [$\mu\text{V}/(^{\circ}/\text{s})$]
- за $Q \sim 1200$, резолюцията е ~ 0.01 [$^{\circ}/\text{s}$] при 1 Hz честотна лента.
- Мин. детектиран сигнал $\sim 5 \times 10^{-3}$ [$^{\circ}/\text{s}$] за 10 Hz честотна лента



Блок диаграма на отчитащата и управляващата електроника необходима за отворен-контур схема на вибриращ пръстеновиден жirosкоп.

Браунов шум

Минимално детектираната ъглова скорост ($\omega_{z(min)}$) за вибриращия пръстеновиден микроскоп е право пропорционална на минималното детектирано напрежение на електрода на сензора $v_{s(min)}$ което се определя чрез входния еталонен шум на отчитащата верига и шума на напрежението получено в сензора дължащо се на Брауновото движение в пръстеновидната структура. Брауновото движение на една структура е механично-термичен шум предизвикан от молекулярна колизия от обкръжаващата среда и представлява фундаментален шумов компонент на сензорната структура. Според релацията на Nyquist спектралната плътност на променящата се сила отнесена към произволно механично съпротивление е:

$$F_n = \sqrt{4k_B T R} \quad \text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$$

където k_B е константата на Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) и T е абсолютната температура. За система маса-пружина-демпфер от втори ред демпфериращия фактор D е еквивалентен на механичното съпротивление (R) и Брауновото шумово преместване съответстващо на тази променлива сила отнесена към това демпфериране става

$$|x_{\text{brownian}}| = \sqrt{4k_B T D} \cdot G(f) \quad \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$$

където $G(f)$ е силовата трансферна функция на системата от втори ред от типа маса-пружина-демпфер:

$$G(f) = \frac{K^{-1}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f}{Qf_0}\right)^2}} \quad \text{for } \omega = \omega_0 \Rightarrow |x_{\text{brownian}}| = \sqrt{\frac{4k_B T Q}{M\omega_0^3}}$$

$$Q = \sqrt{KM/D} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{K/M}$$

За намаляване на Брауновия шум - голяма маса и резонансна честота

The terms used in this technical article are defined as follows:

Power supply (V): This parameter defines the operating DC power supply voltage range of the MEMS gyroscope. It is recommended to keep Vdd clean with minimum ripple. A good practice is to use an ultra-low noise, low-dropout regulator to power the MEMS gyroscope.

Power supply current (mA): This parameter defines the typical current consumption when the MEMS gyroscope is operating in normal mode.

Power supply current in sleep mode (mA): This parameter defines the current consumption when the MEMS gyroscope is in sleep mode. To reduce power consumption and have a faster turn-on time, in sleep mode the driving circuitry is on, the mechanical mass is kept oscillating and the reading chain is turned off. For analog gyroscopes, an external pin can be used to configure this mode. For digital gyroscopes, users can configure a control register through the I2C/SPI interface for this mode. Other suppliers don't provide a sleep mode (or standby mode).

Power supply current in power-down mode (μ A): This parameter defines the current consumption when the MEMS gyroscope is powered down. During this mode, both the mechanical sensing structure and reading chain are turned off. For analog gyroscopes, an external pin can be used to configure this mode. For digital gyroscopes, users can configure the control register through the I2C/SPI interface for this mode. Full access to the control registers through the I2C/SPI interface is guaranteed also in power-down mode.

Full-scale range (dps): This parameter defines the measurement range of the **gyroscope** in degrees per second (dps). When the applied angular velocity is beyond the full-scale range, the gyroscope output signal will be saturated. However, this saturation will not damage the gyroscope and will have no negative impact on its performance.

Zero-rate level (V or LSBs): This parameter defines the zero-rate level voltage for **analog** gyroscopes when no angular velocity is applied to the MEMS gyroscope sensing axis. It is not ratiometric to the power supply voltage and ideally it is equal to the output reference voltage V_{ref} on a dedicated output pin for analog gyroscopes. For digital gyroscopes, the zero-rate level is typically 0 LSBs. It is also not ratiometric to the power supply voltage.

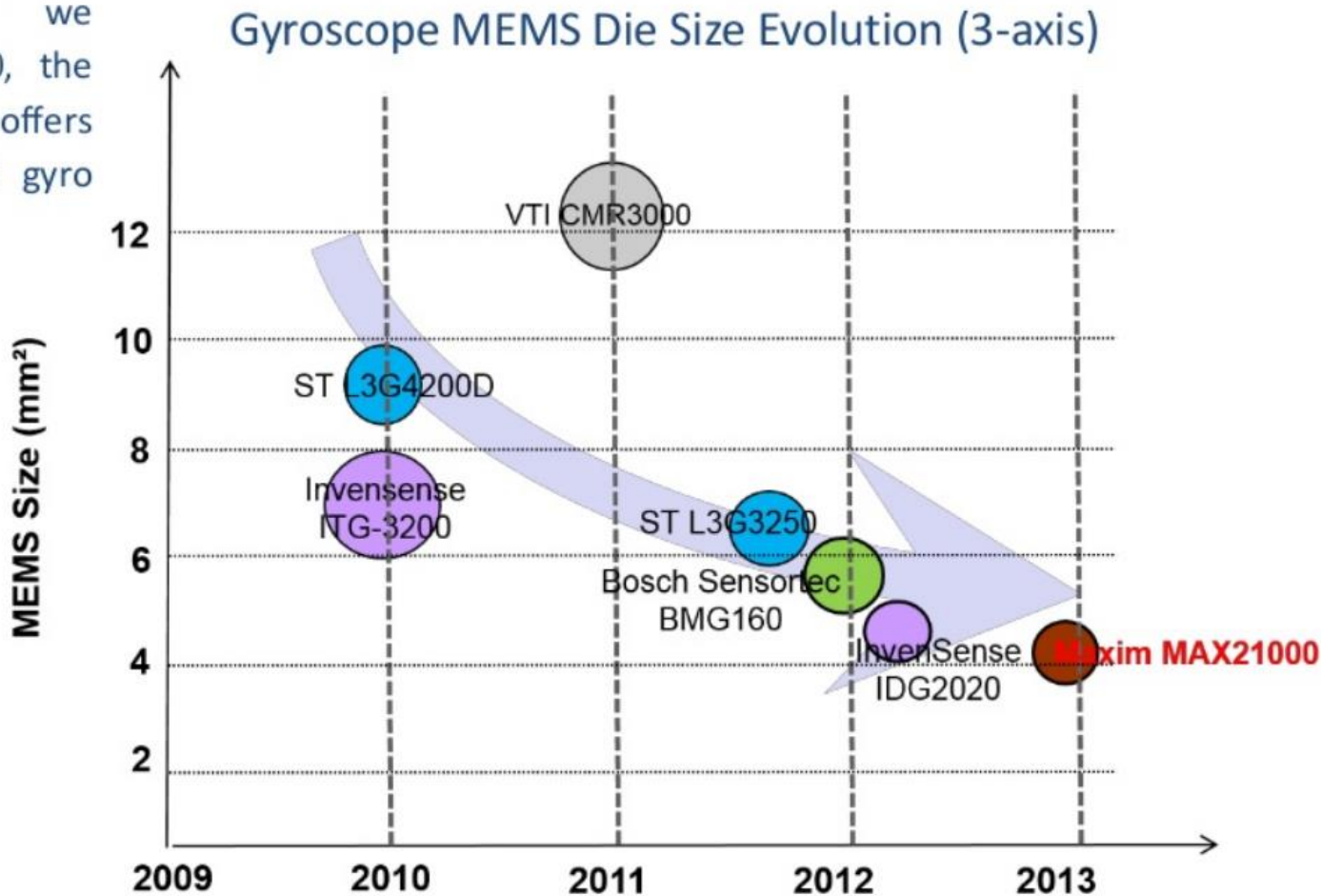
Sensitivity (mV/dps or mdps/LSB): Sensitivity in mV/dps defines the relationship **between** 1 dps and the analog gyroscope's output voltage change over the zero-rate level. Using this parameter the user can convert the gyroscope's output voltage signal into angular velocity. For digital gyroscopes, sensitivity (mdps/LSB) is the relationship between 1 LSB and milli dps. So the user can directly convert a digital gyroscope's measurement in LSBs to angular velocity.

Sensitivity change vs. temperature (%/°C): This parameter defines the **sensitivity change** in percentage per °C when the temperature varies from 25°C room temperature for analog gyroscopes. For digital gyroscopes, it defines the sensitivity change in percentage (%) over the operating temperature range specified in the datasheet (for example, from -40°C to +85°C).

Least significant bit (lsb) is the bit position in a binary integer giving the units value, that is, determining whether the number is even or odd. The lsb is sometimes referred to as the *right-most bit*, due to the convention in positional notation of writing less significant digits further to the right. It is analogous to the least significant digit of a decimal integer, which is the digit in the *ones* (right-most) position

MEMS жирокопът с най-малки размери до 2014 е на фирмата *Maxim* модел MAX21000

• Upon components we analyzed since 2010, the MAX21000 currently offers the smallest MEMS gyro die area!



Die Size Evolution of MEMS Gyroscopes
Source: Yole/S+C Inertial MEMS Manufacturing Trends 2014

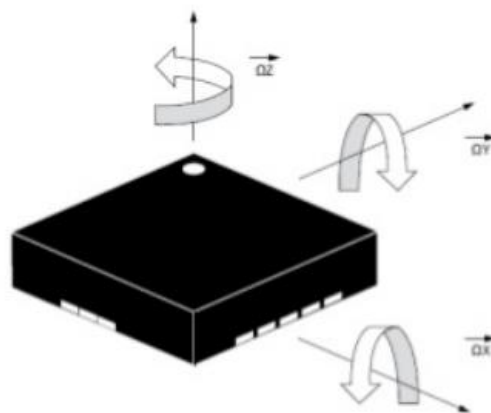
Външен вид на жироскопа MAX21000

- Package: LGA 16-pin
- Dimensions: 3.0 x 3.0 x 0.9mm
- Pin Pitch: 0.5mm
- Marking:

MXG3A

1329I

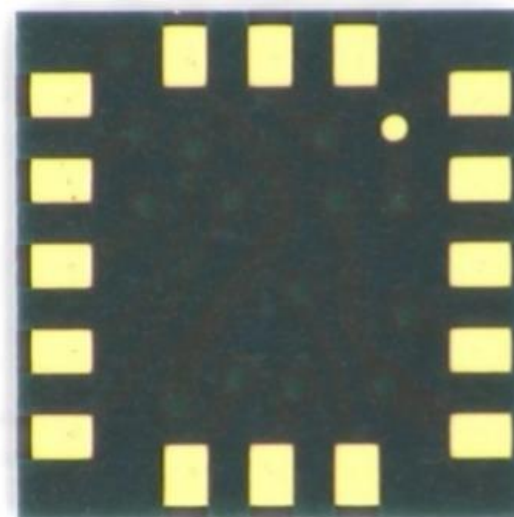
010FA



*Orientation of Axes
(from datasheet)*



Package top view



Package back view

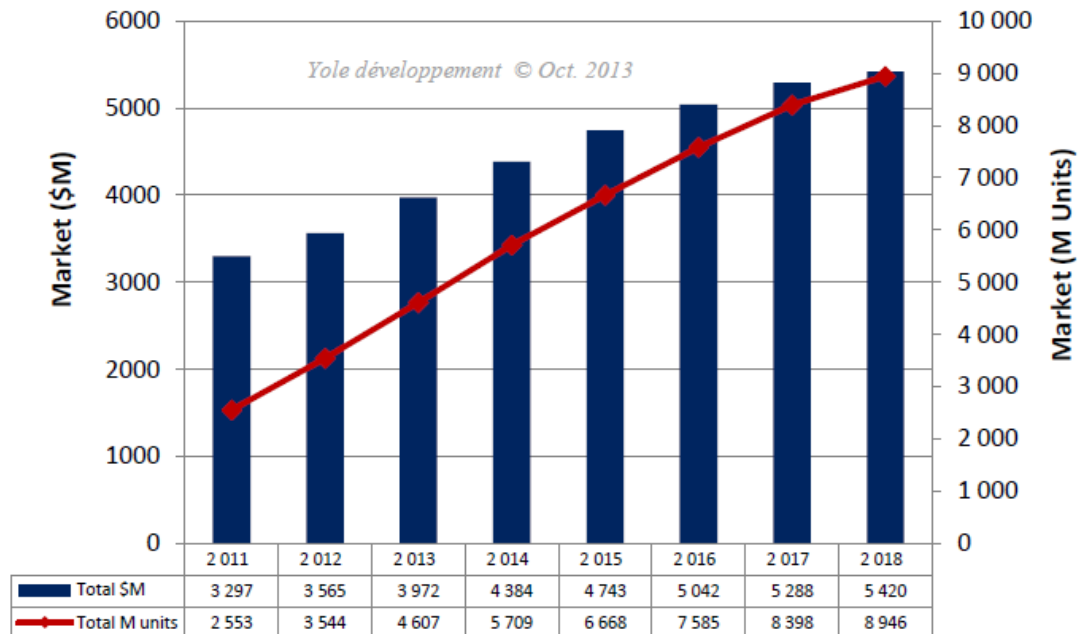


Package Side View

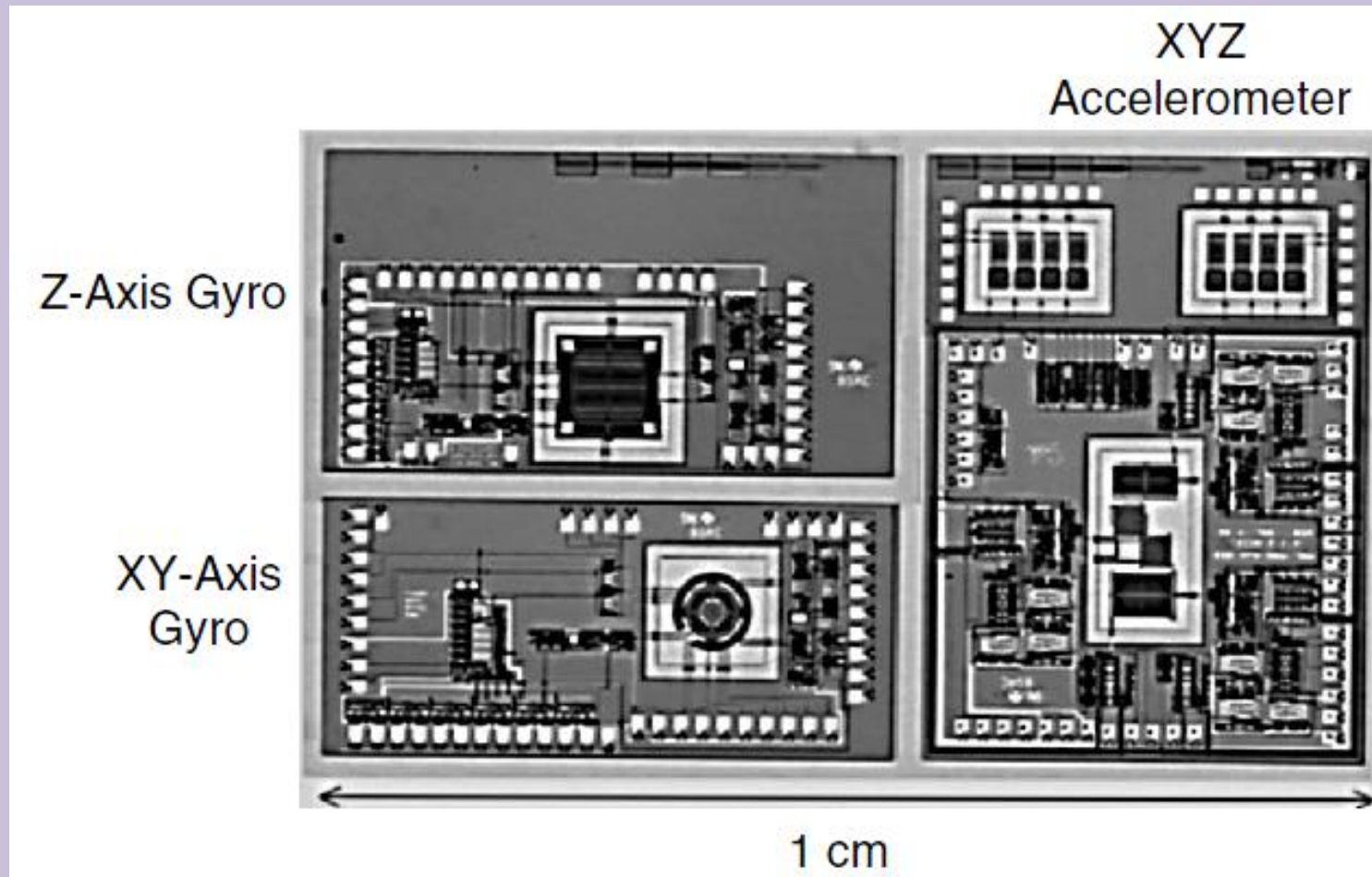
Inertial MEMS Market Forecast

- Inertial sensors is a \$4B market in 2013!
 - Growing to \$5.4B soon, driven by the growth of the mobile market
- Volumes are booming: 9B units predicted in 2018!
 - As combo solutions are adopted in consumer and automotive, the added value of each device is increasing

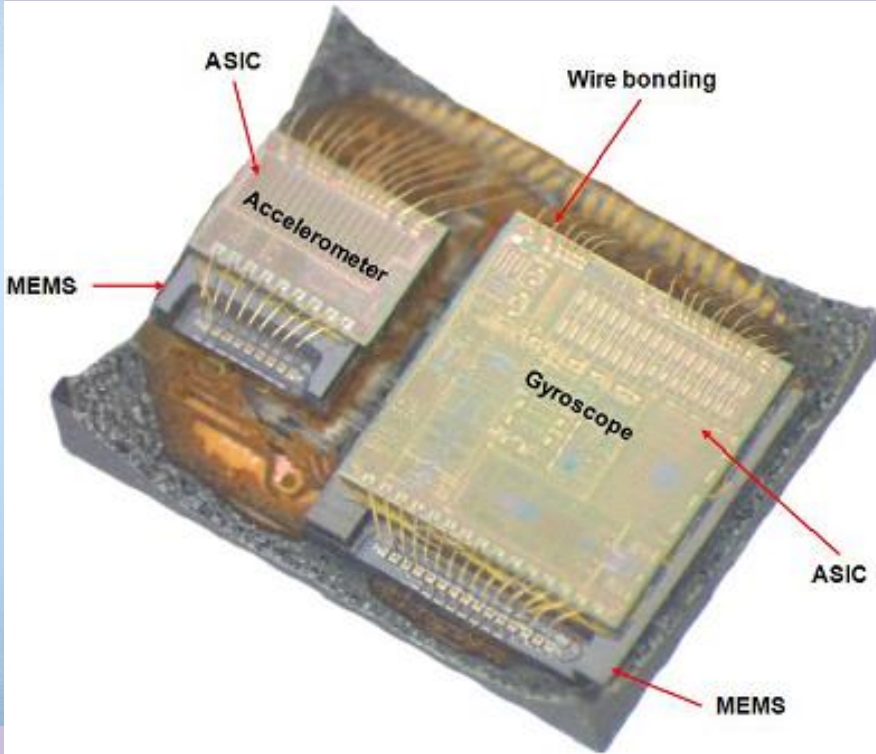
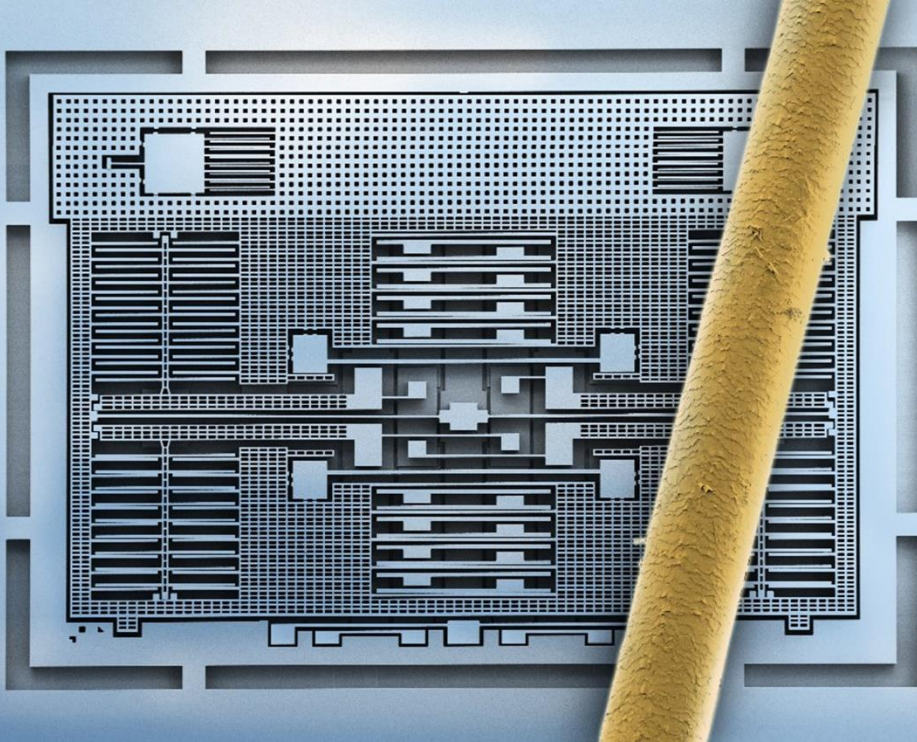
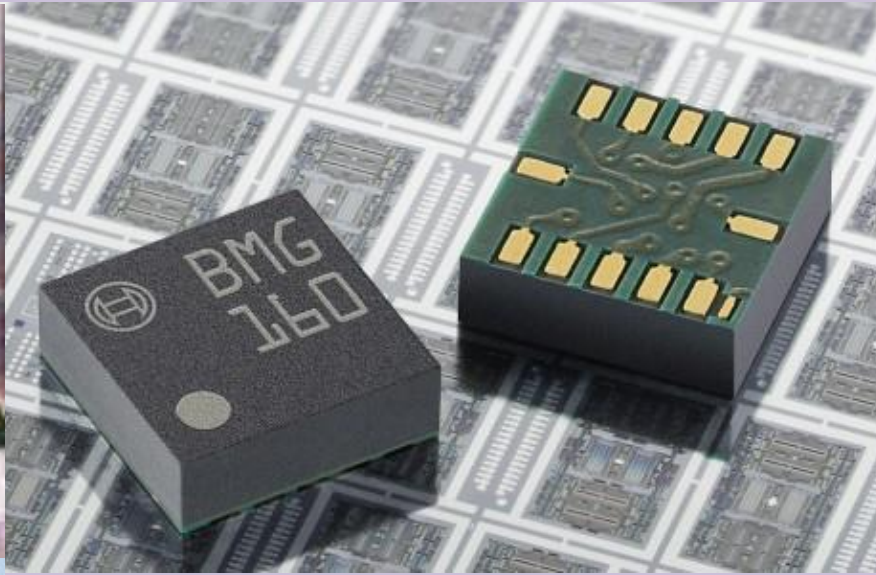
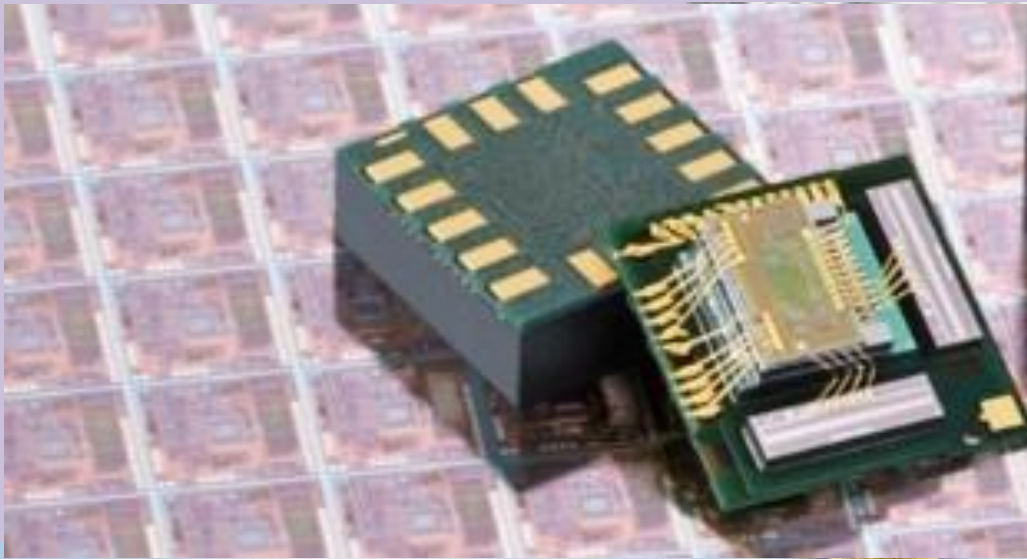
Global MEMS Inertial Sensor Market - 2011 - 2018 market

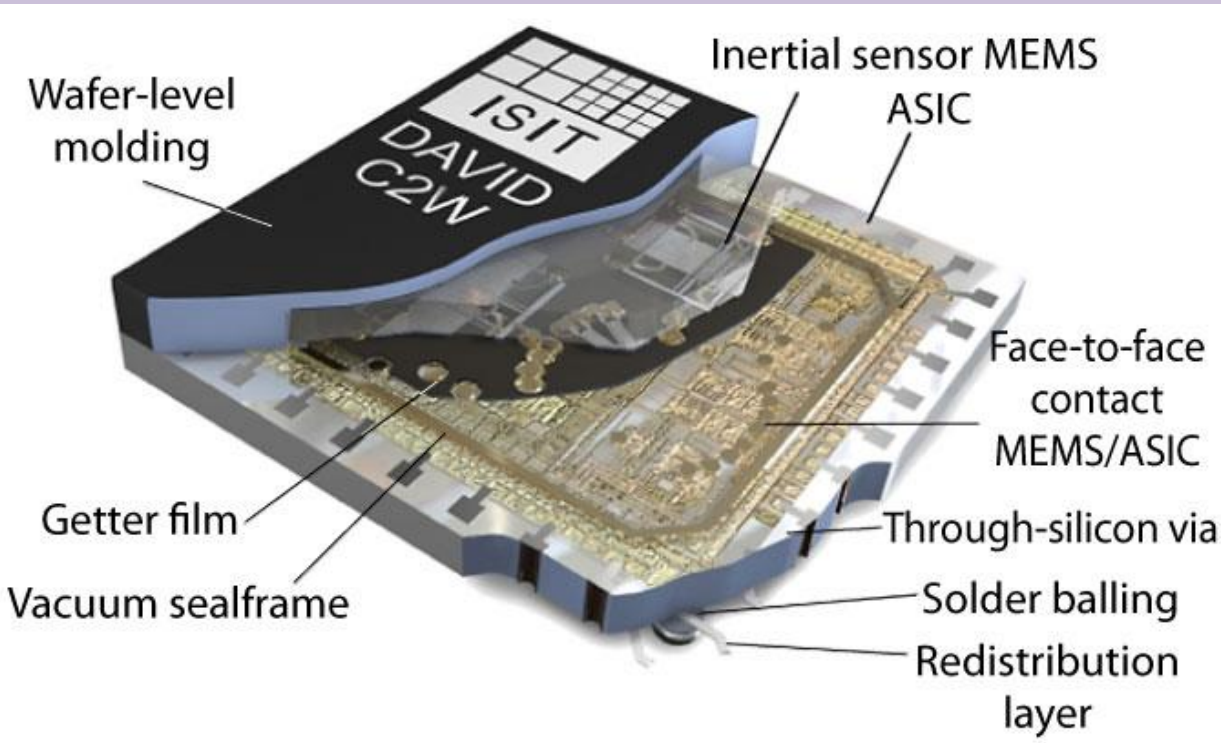


Инерционен измервателен модул



(inertial measurement unit IMU) една от първите MEMS разработки.





ASIC - Application-specific integrated circuit



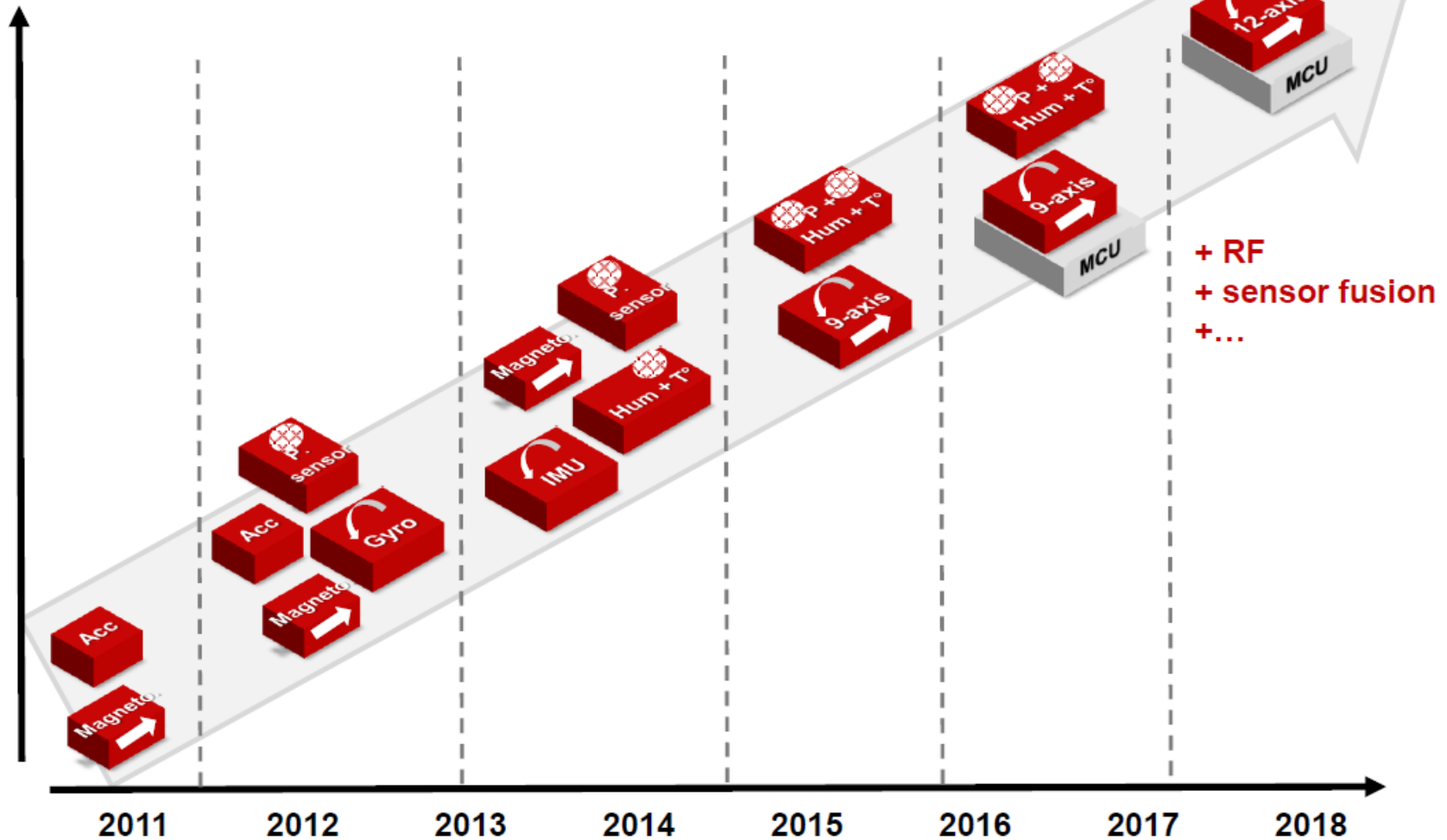
8. The EU-funded microscopic-sized gyroscope DAVID (Downscale Assembly of Interconnected Devices) project focuses on developing an inertial sensor system with extremely high packaging density for the hybrid integration of MEMS and ASIC devices.

Инерционен измервателен модул (IMU) с 10 степени на свобода: 3 осов акселерометър; 3 осов жирокоп; 3 осов магнитометър и сензор за налягане

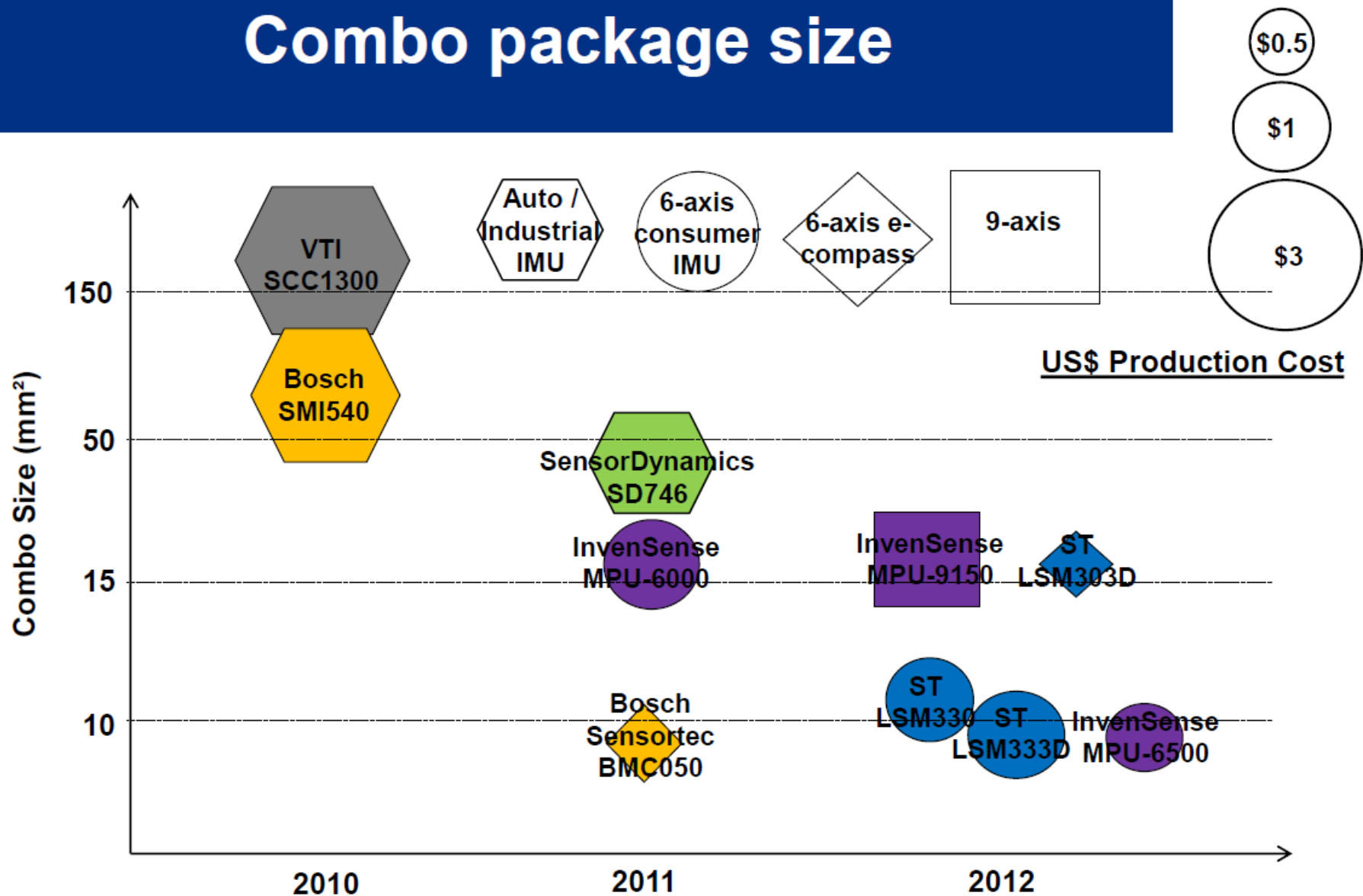
Combo sensors become mainstream

Combo sensor roadmap for mobile devices

Level of integration

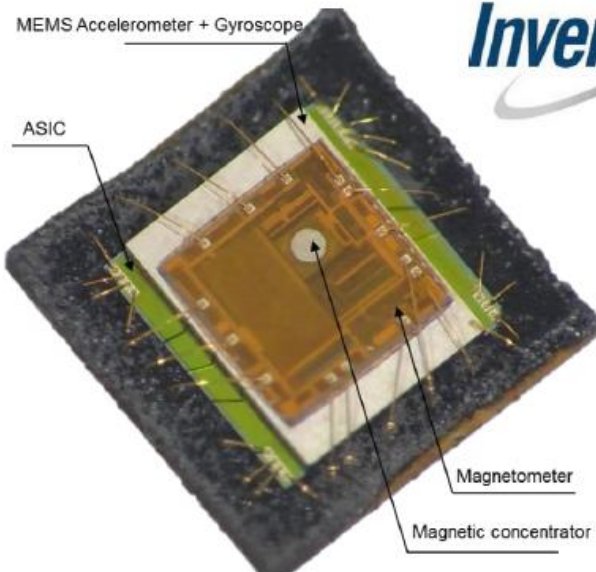
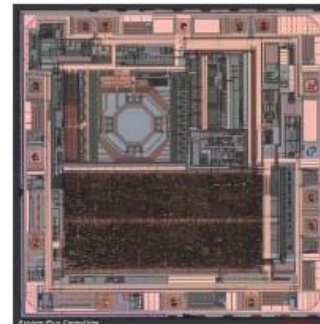
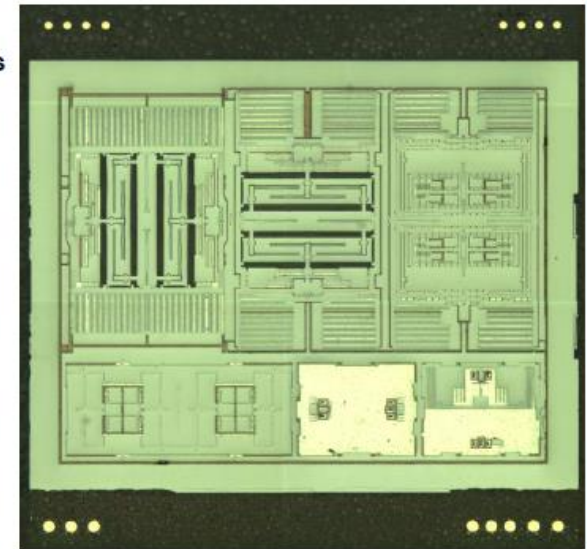


Combo package size

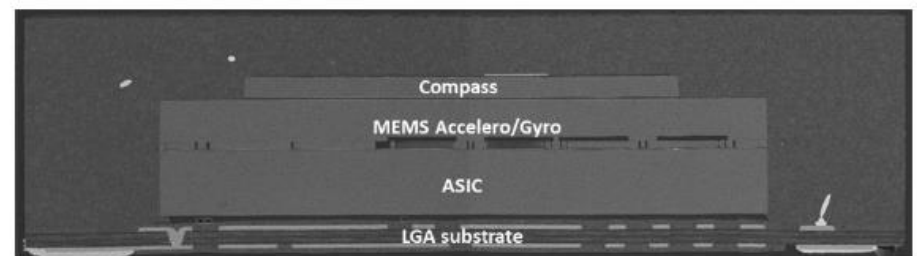


InvenSense MPU-9150 9-Axis IMU (2012) Overview

- Specificities of this component:
 - Small package: 4x4mm²
 - MEMS part is single chip: single ASIC & MEMS monolithic structure bonded to the ASIC
 - Single die for magnetometer. Rather large: 3.76mm²
 - Accelerometer: separate structures for the 3 axis. Gyro: single structure for the 3 axis (smaller than accel part)
 - Advanced ASIC technology node (MEMS): 0.18um
 - Rather old ASIC technology node (Magnetometer): 0.35um

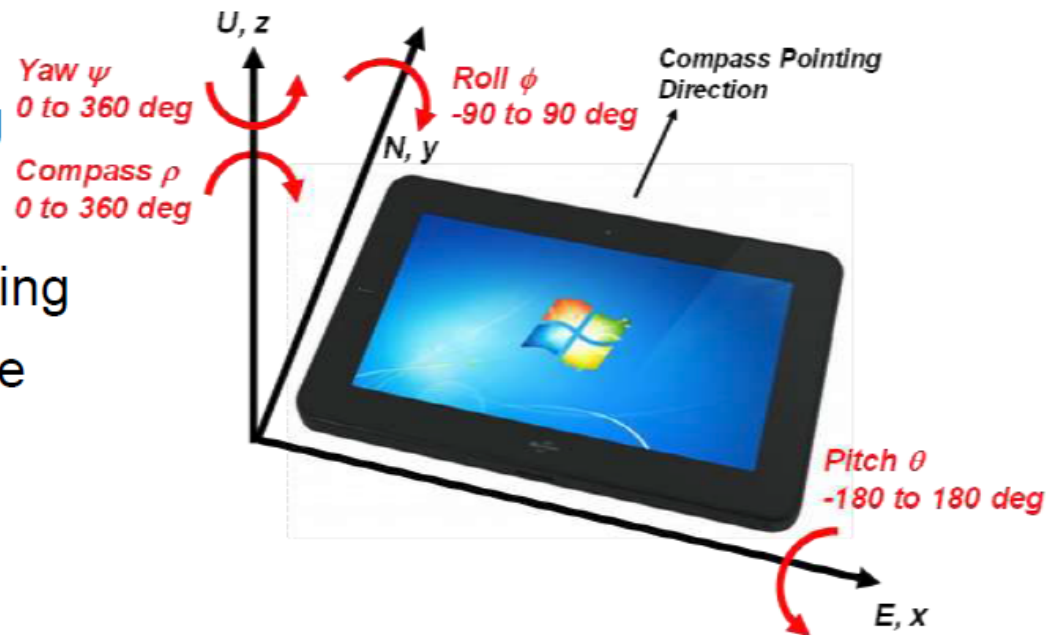


InvenSense



Windows 8 Coordinate System

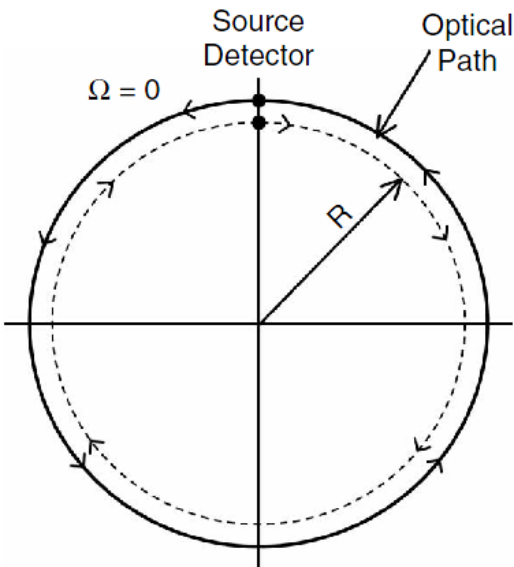
- Termed “ENU” system: x=East, y=North, z=Up
- Gravity positive, acceleration negative
- Roll range -90 to 90 deg
- Pitch range -180 to 180 deg
- Yaw range 0 to 360 deg
- Yaw=**Minus** Compass heading
- Angle convention: Clockwise
- Sequence: Yaw, Pitch, Roll



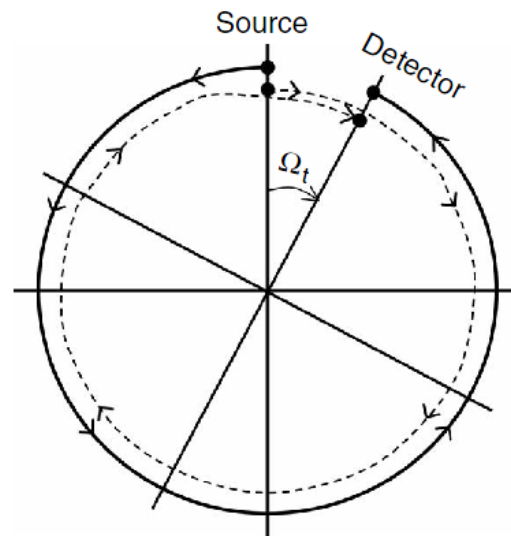
Оптични жирокопи

Базирант се на ефекта на *Sagnac* (1913) – два противоположно въртящи се в кръг с радиус R светлинни лъча, като самите носители на светлина се въртят ъглова скорост Ω . Забелязва се разлика във времето Δt на двата лъча. Ако оптичните носители не се въртят, оптичните сигнали изминават пътя в двете посоки за едно и също време. Ако оптичният носител се върти оптичният сигнал, който се движи в същата посока ще има малко по-голямо разстояние за изминаване спрямо лъча движещ се в обратна посока. Това е причината за поява на разликата във времето Δt на двата лъча, което се пресмята чрез формулата

$$\Delta t = N2\pi R \left(\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c+v} \right) \approx \frac{N4\pi R^2 \Omega}{c^2}$$



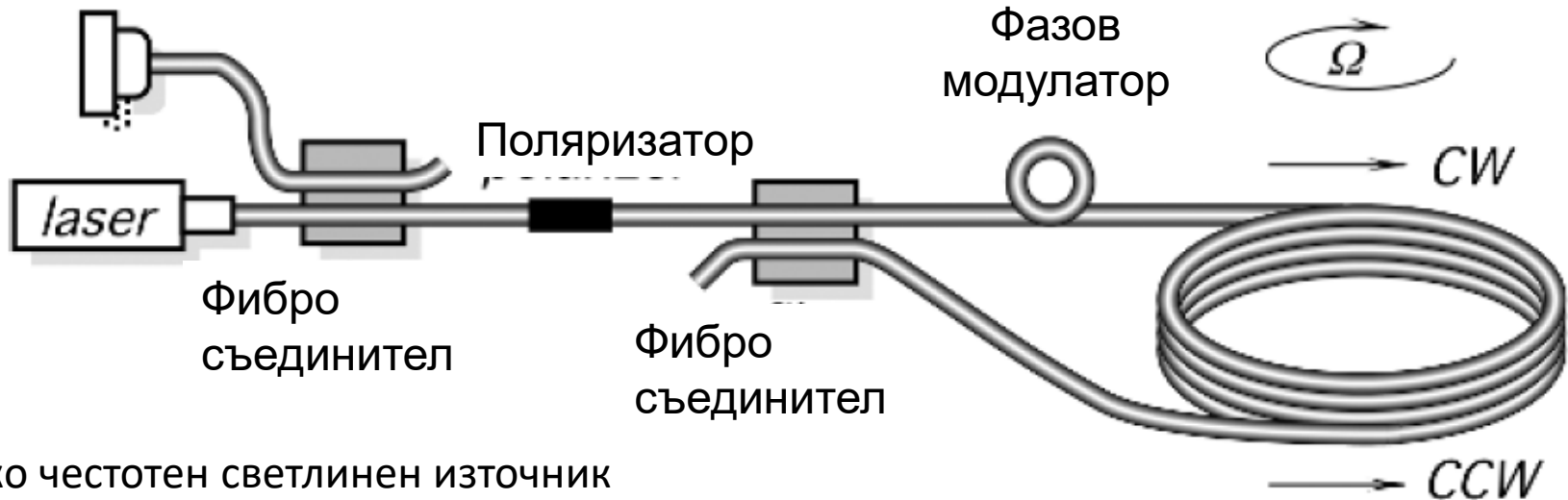
(a) Optical path stationary



(b) Optical path rotating with angular velocity Ω

N – брой обиколки, c – скоростта на светлината. Отчита се време или разлика във фази на двата лъча. Носителят на светлина е бобина от влакнеста оптика с N навивки. Това е залегнало в основата за разработване на фибро-оптични жирокопи (Interferometric fiber-optic gyro - IFOG).

Светлинен детектор



Широко честотен светлинен източник (светодиод) се използва за свързване на лъча във входния и изходния фибро кабел.

Входния лъч минава през поляризатор който осигурява взаимодействие със срещуположния лъч през оптичната бобина. Изходния лъч минава през поляризатор. Втори централен куплунг разделя двата лъча в оптичната бобина, където минава през модулатор използван за генериране на време-променящ се изходен сигнал показващ ротацията. Модулаторът е изместен от центъра на бобината за да се изясни фазовата разлика на срещуположните лъчи. След минаване през бобината двата лъча се рекомбинират обратно в поляризатор и се насочват в детектор. Фазовата разлика в двата лъча е пропорционална на ъгловата скорост на бобината.

Няма движещи се части, висока надеждност и ниска цена. Поддръжка на навигационни системи, насочване и настройване на антени, инерционни измервателни системи за космически кораби и военни ракети, в управлението на *Boeing 777* и хеликоптери *Comanche*. Разработени са за поддържане на управлението на продължителни космически полети.

He-Ne Ring Laser Gyroscope (RLG)

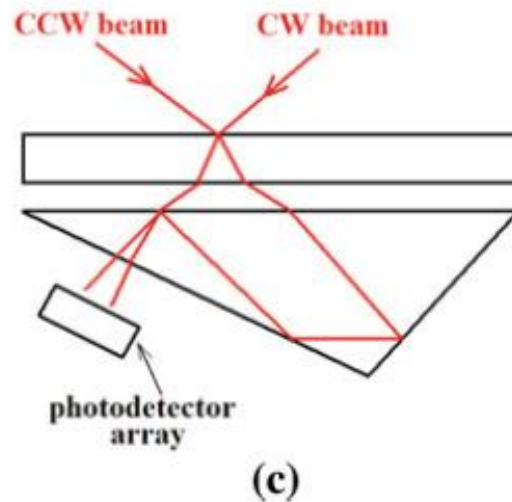
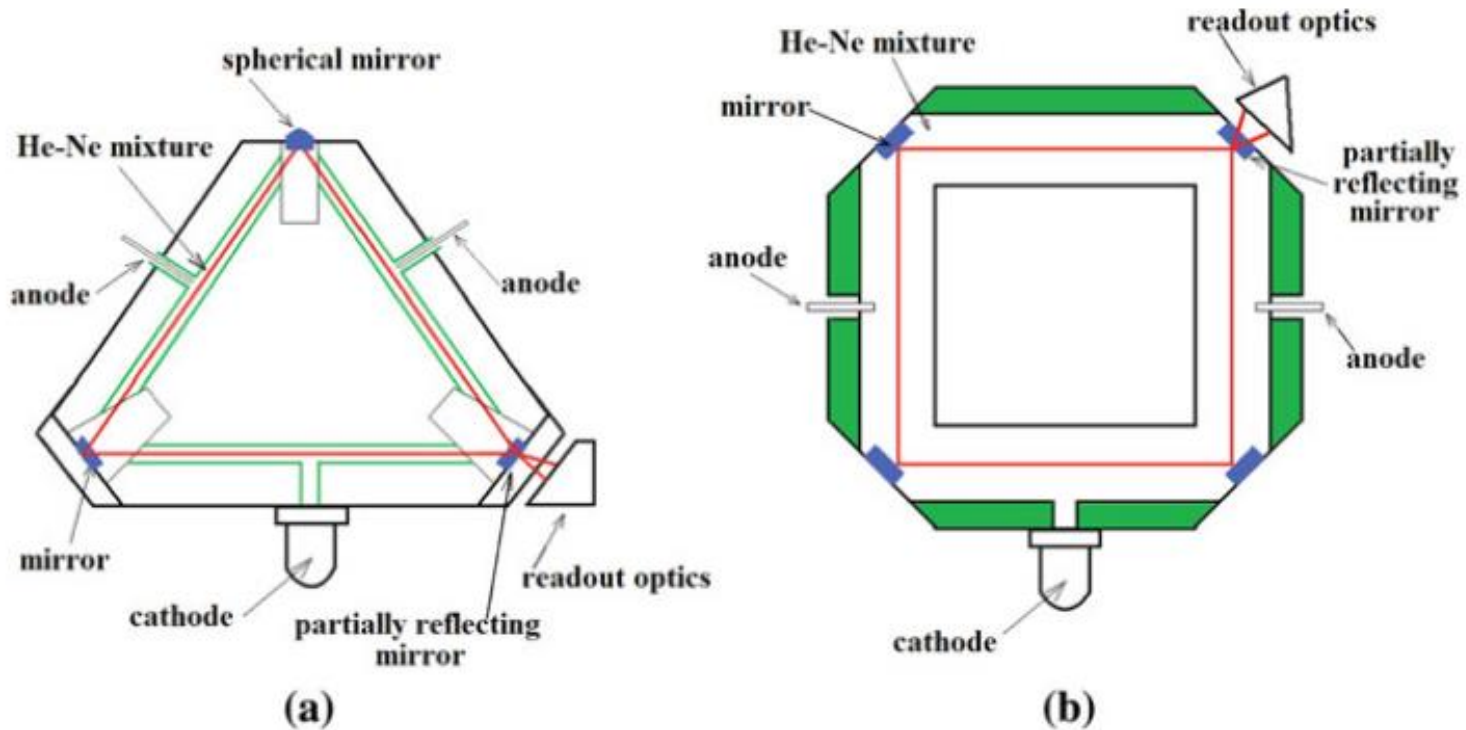
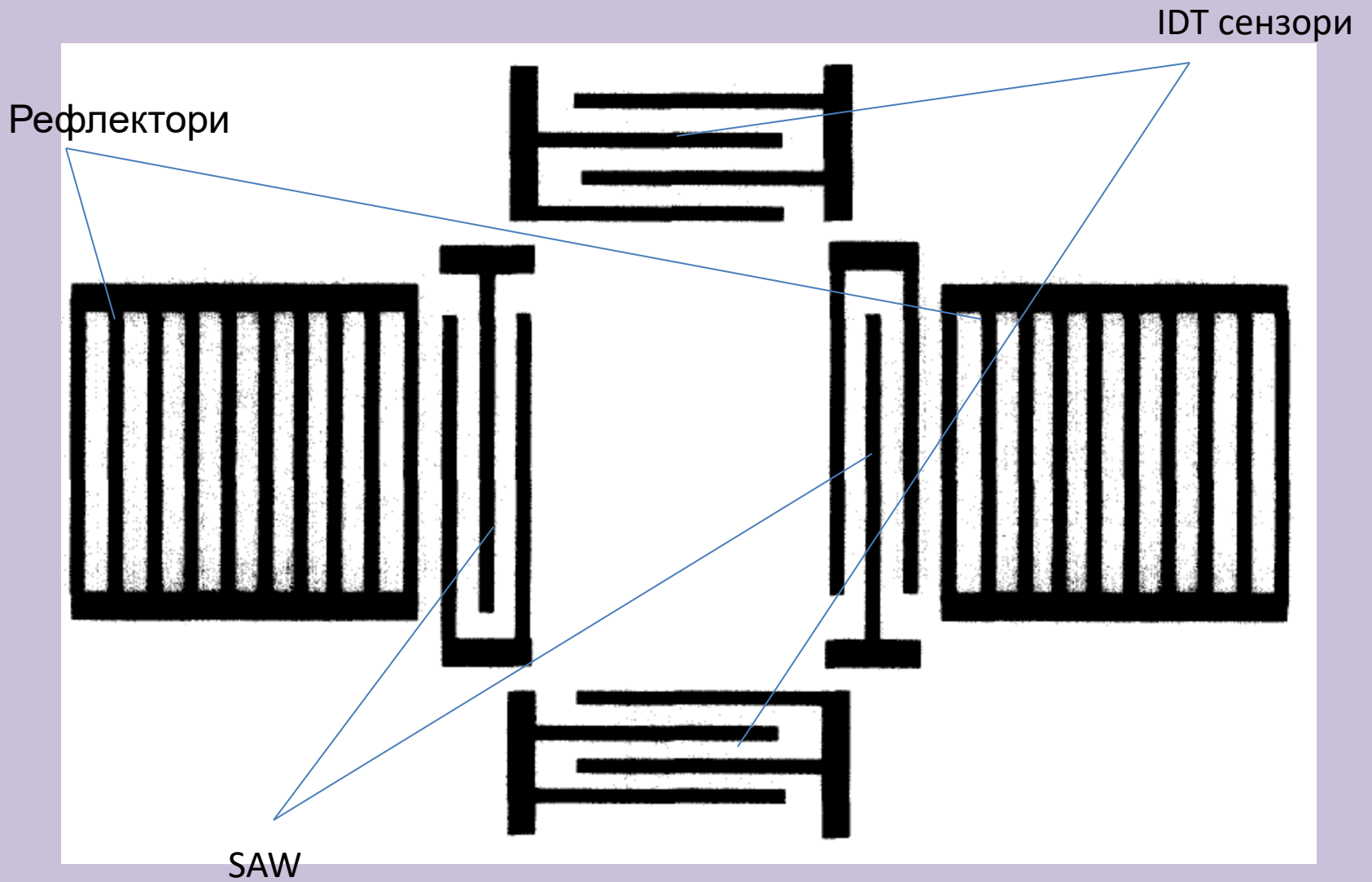
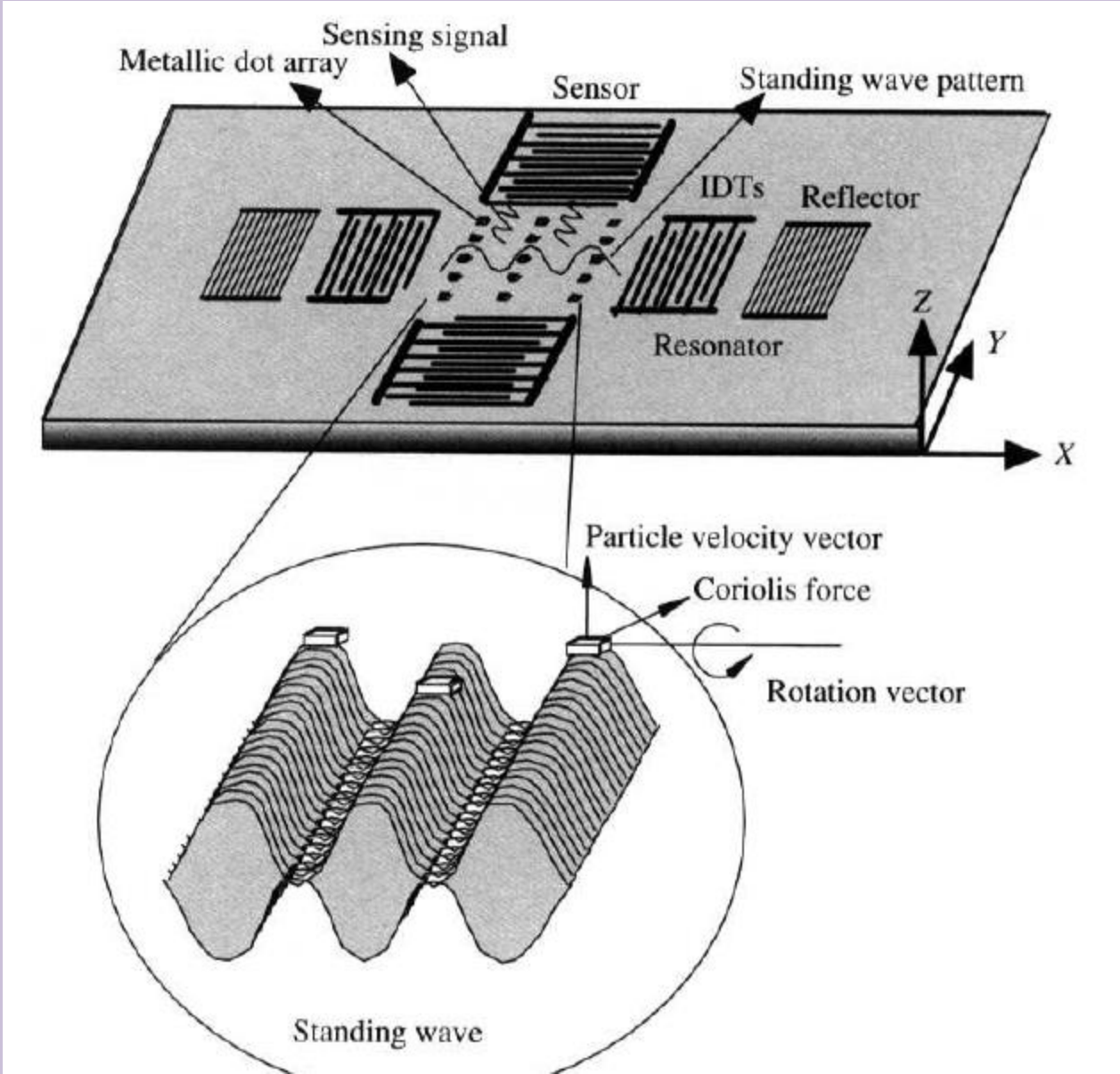
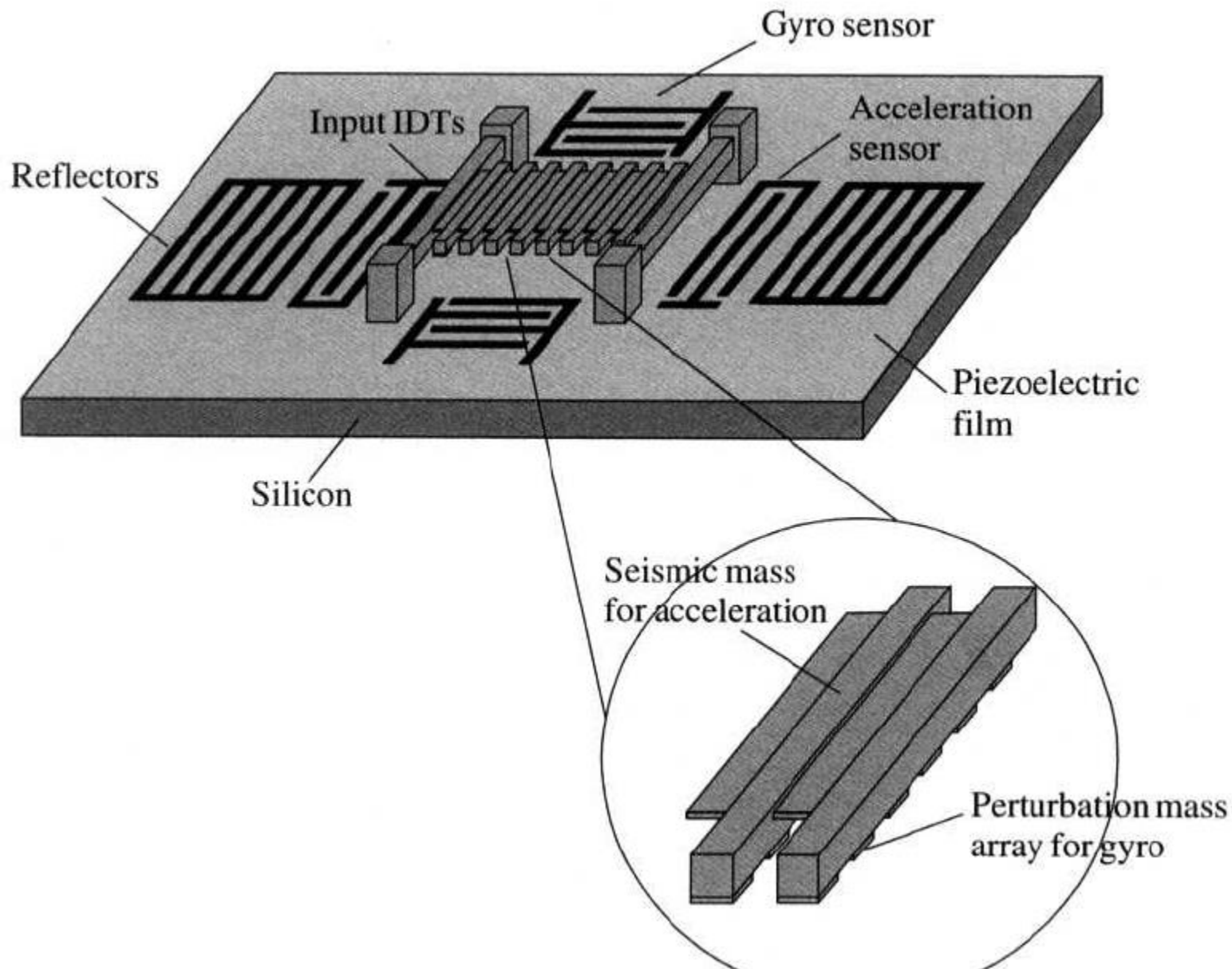


Схема на SAW-IDT жирокоп IDTs and a SAW resonator

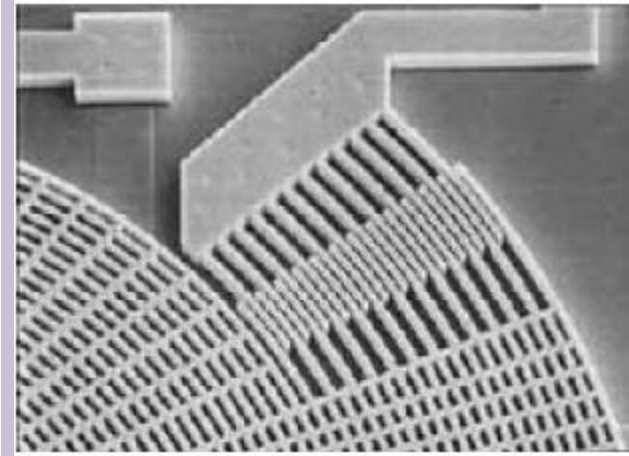
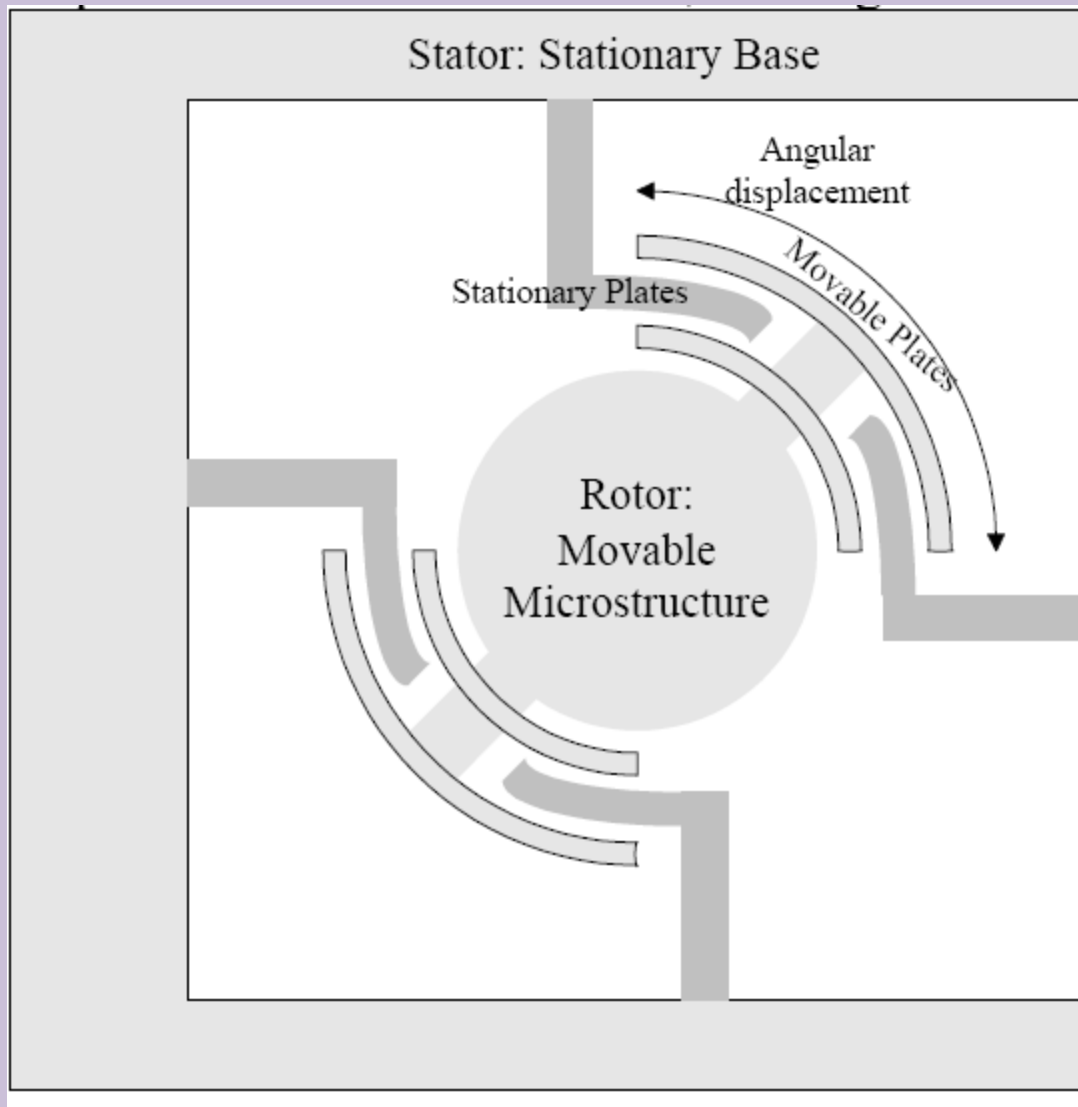




Конструкция на MEMS-IDT микросензорна система комбинираща акселерометър с жироскоп в един чип



Инерционен жirosкоп (акселерометър за ъглова скорост)



Измерва се ъглово ускорение чрез промяна на капацитета между ротационно движещи се пластини на ротора и неподвижни пластини на статора. Пластините са оформени по дъги от концентрични окръжности.

Литература

1. Tummala R. R., Fundamentals of Microsystem Packaging, CRC Press, 2001.
2. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu, Fiber optic sensors - 2nd ed., Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
3. Gardner J. W. , Vijay K. Varadan V. K., Awadelkarim O. O., Microsensors, MEMS, and Smart Devices , John Wiley & Sons Ltd, 2001.
4. Minhang Bao, Analysis and Design Principles of MEMS Devices Elsevier B.V. , 2005, p 327 .
5. Allen J., Micro Electro Mechanical System Design, Taylor and Francis Group, LCC, 2005, p. 337.
6. Cenk Acar and Andrei Shkel, MEMS Vibratory Gyroscopes Structural Approaches to Improve Robustness, 2009 Springer Science+Business Media, LLC, p. 262.
7. M. N. Armenise C. Ciminelli, F. Dell'Olio, V. M. N. Passaro, Advances in Gyroscope Technologies, Springer, 2010, p. 127

Въпроси?

