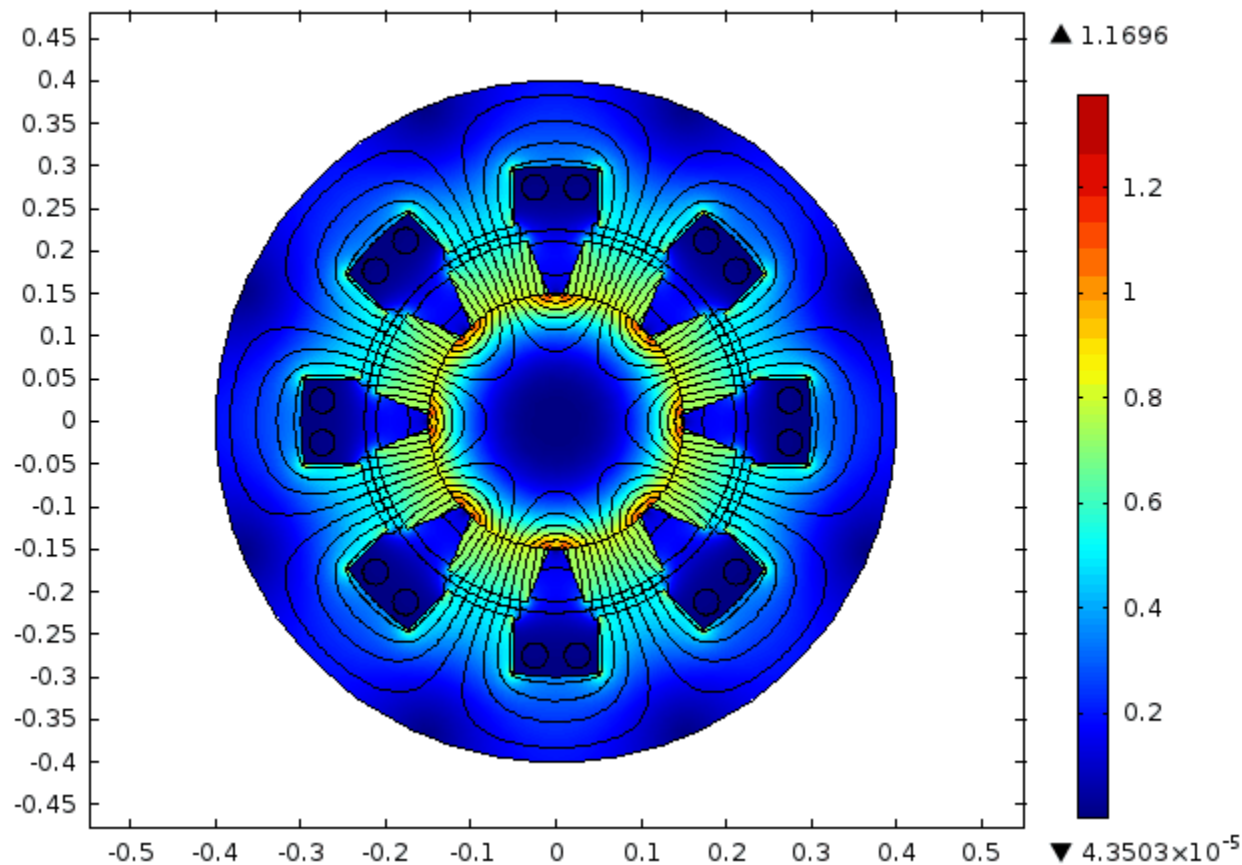


# 11.0 ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПРЕОБРАЗУВАНЕ

Time=0 Surface: Magnetic flux density norm (T)  
Contour: Magnetic vector potential, Z component (Wb/m)

COMSOL  
MULTIPHYSICS

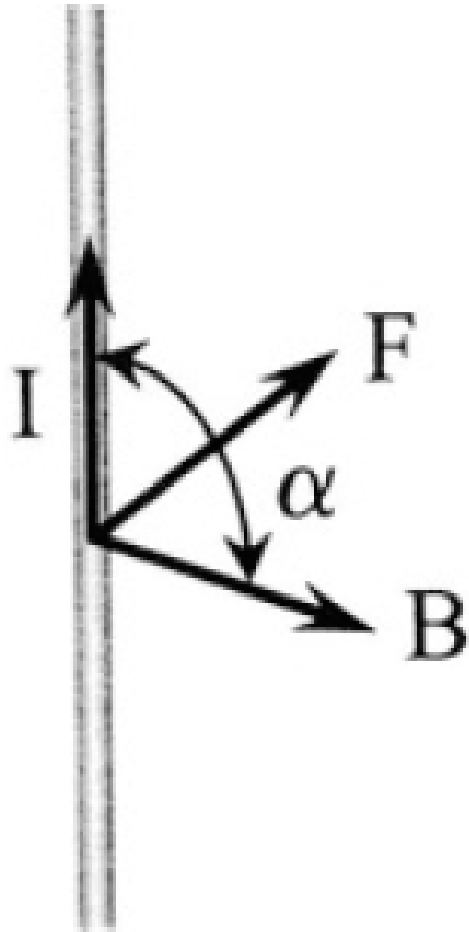


# Съдържание

- *Приложение на лоренцова сила в MEMS*
- *MEMS актуатори, базирани на промяна на магнитното съпротивление*
- *Електродинамични MEMS*
- *Постоянни магнити и магнитни материали*
- *Магнитострикция и магнитоеластични преобразователи*
- *Ефект на Хол, сензори на Хол*
- *Магниторезистивни сензори*
- *Приложения*

# Електромагнитни МЕМС, базирани на силата на Лоренц

Ако през проводник, намиращ се в магнитно поле с магнитна индукция  $B$  тече ток  $I$ , то в него възниква *Лоренцова сила*

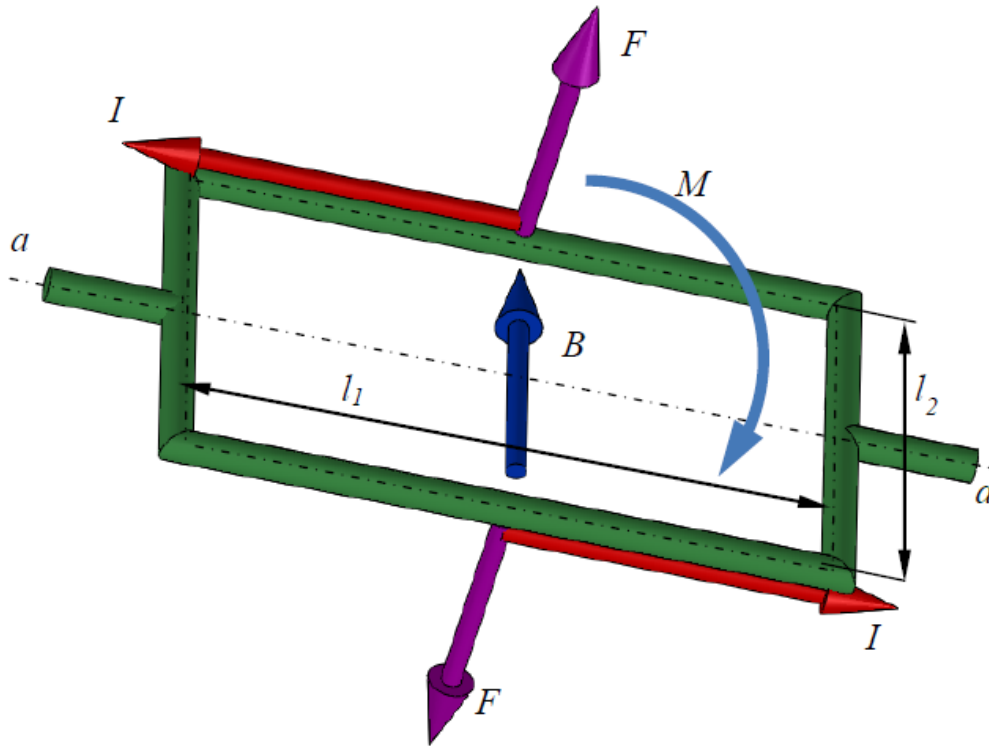


$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = IlB \sin \alpha$$

# Правоъгълен контур

Действат само две  
сили с големина



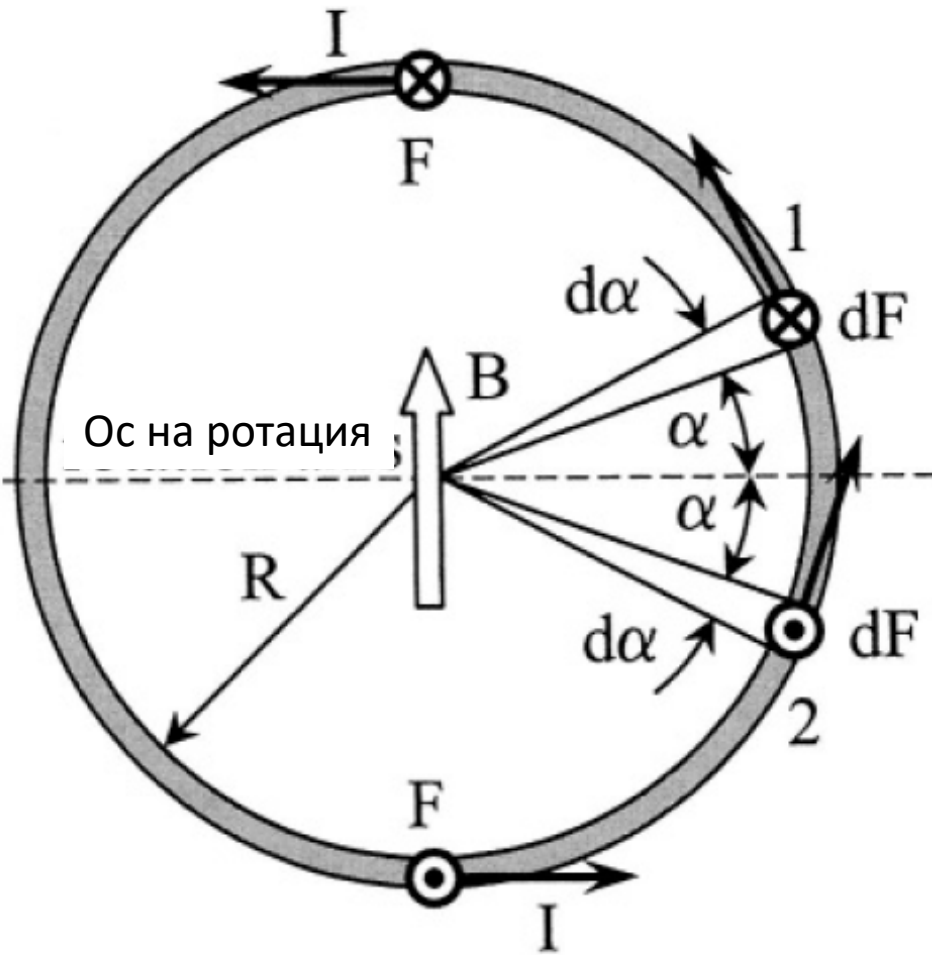
$$F = Il_1 B$$

и момент

$$M = Il_1 l_2 B$$

# Кръгъл контур

$$dF = Id\vec{l} \times \vec{B}$$



$$dF = IRB \sin \alpha d\alpha$$

$$F = \oint dF = \int_0^{2\pi} IRB \sin \alpha d\alpha$$

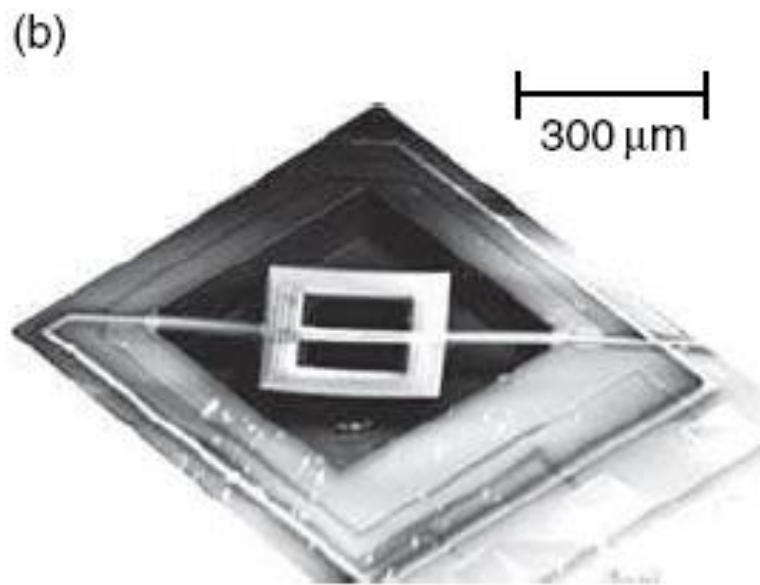
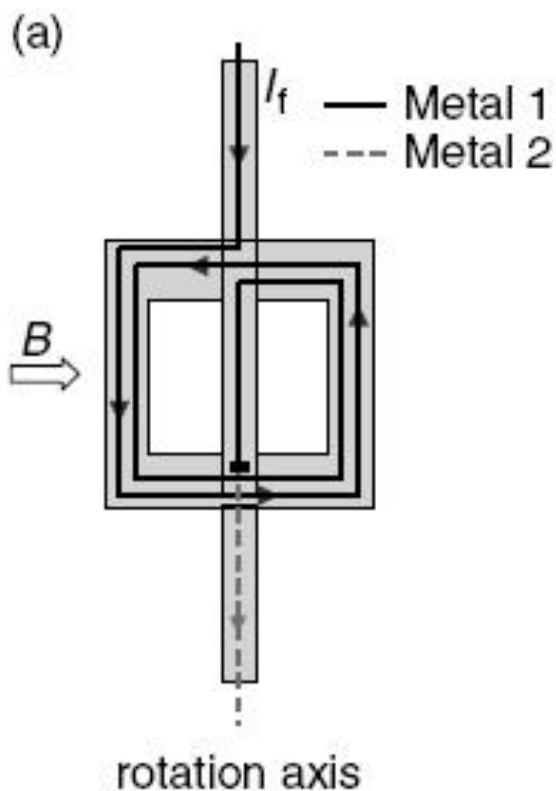
$$dM = 2R \sin \alpha dF$$

$$M = \int_0^{\pi} dM = \pi R^2 IB$$

$$M = IAB$$

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B} \quad \vec{m} = IA\vec{n}_A \quad \begin{array}{l} \text{Магнитен} \\ \text{диполен момент} \end{array}$$

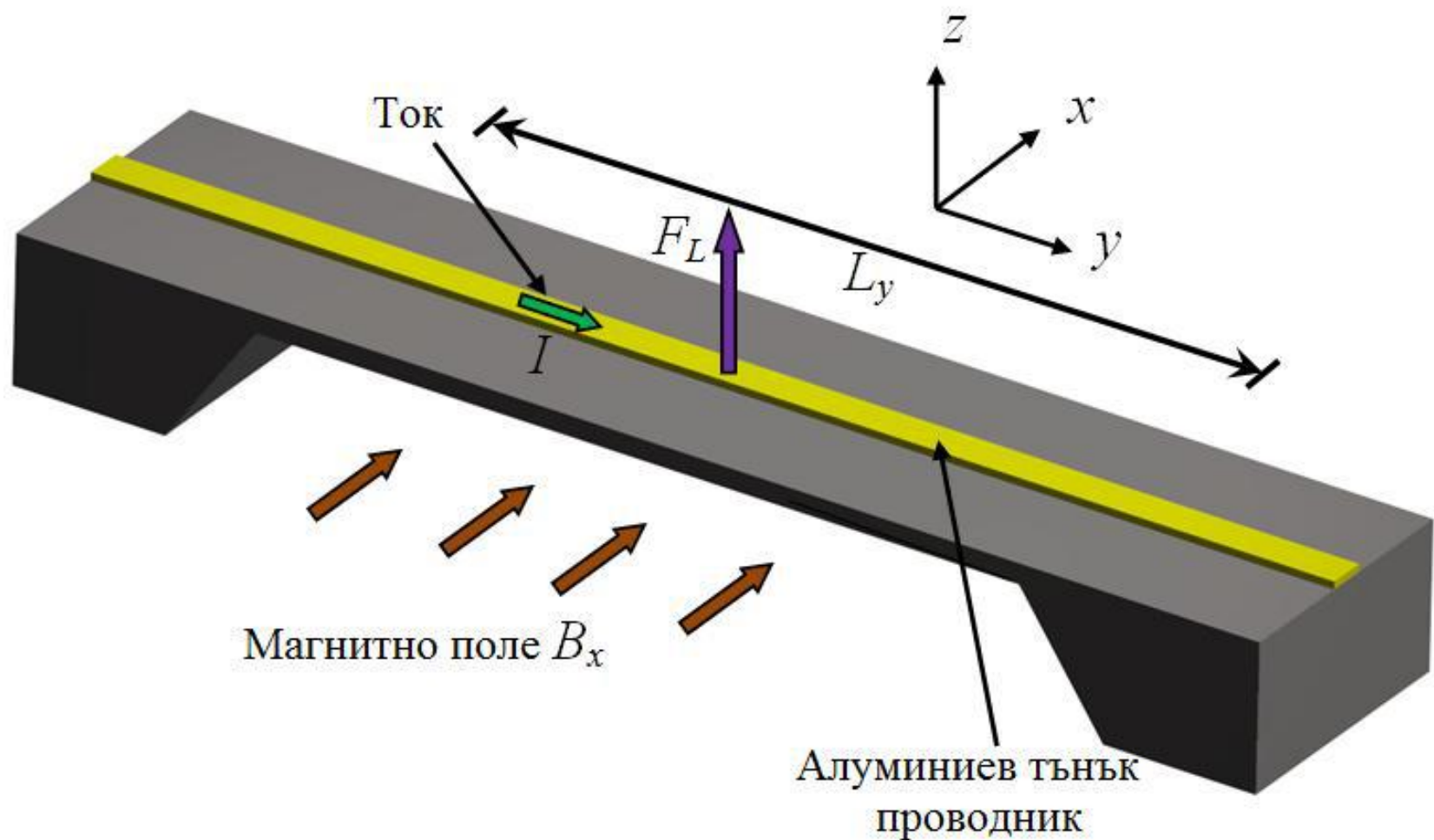
$\vec{n}_A$  - единичен вектор перпендикулярен на равнината на контура



EHT = 20.00 kV  
DIEES

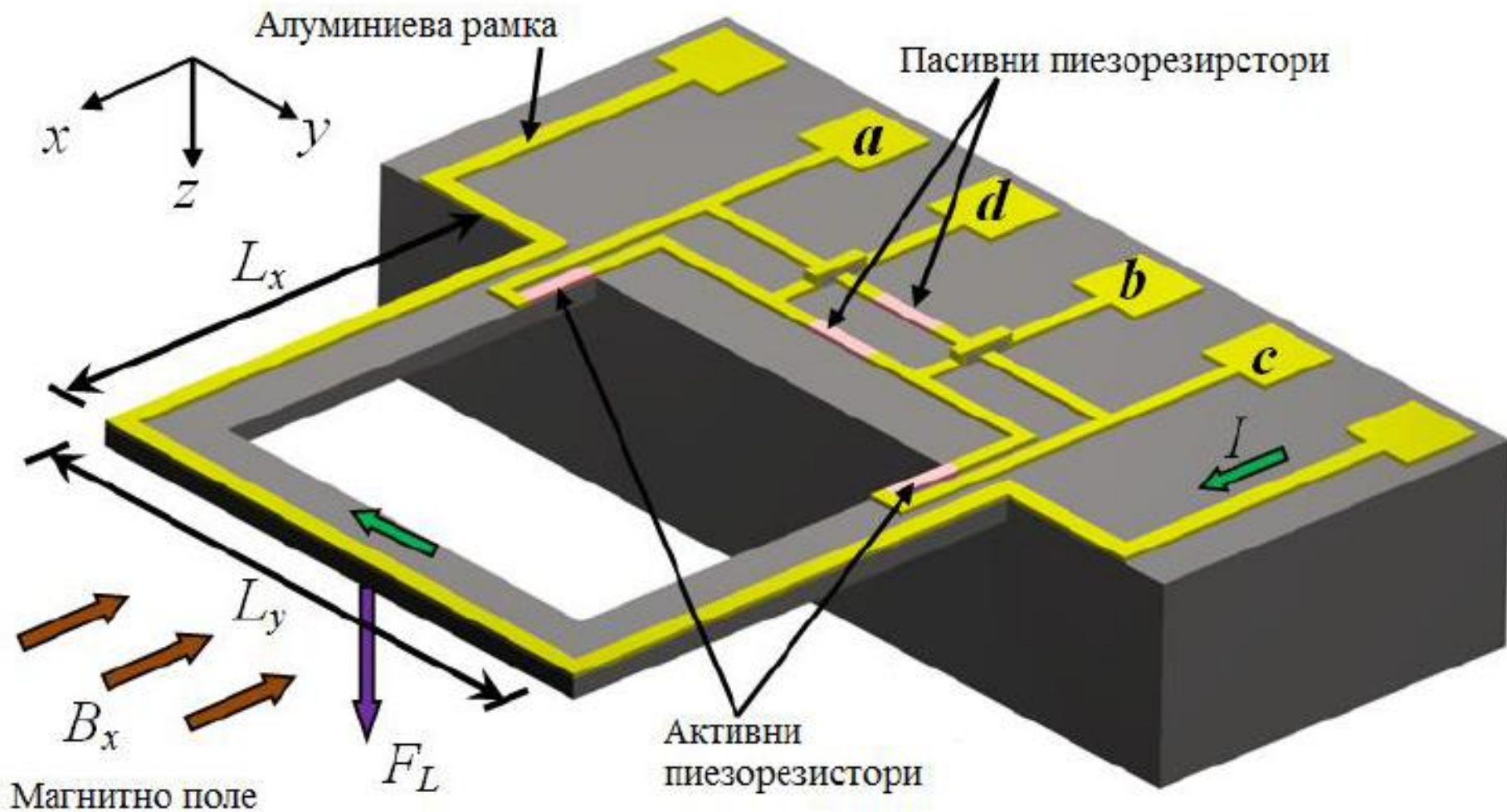
Date: 12 Sep 2000  
Time: 15:41

# Приложение на лоренцова сила в МЕМС



Резонансен сензор: амплитудата на вибрациите на двойно запъната греда е пропорционална на интензитета на магнитното поле. Това създава възможности за измерване на позиция или магнитна индукция. Когато се мери позиция се използва магнитното поле на постоянен магнит.

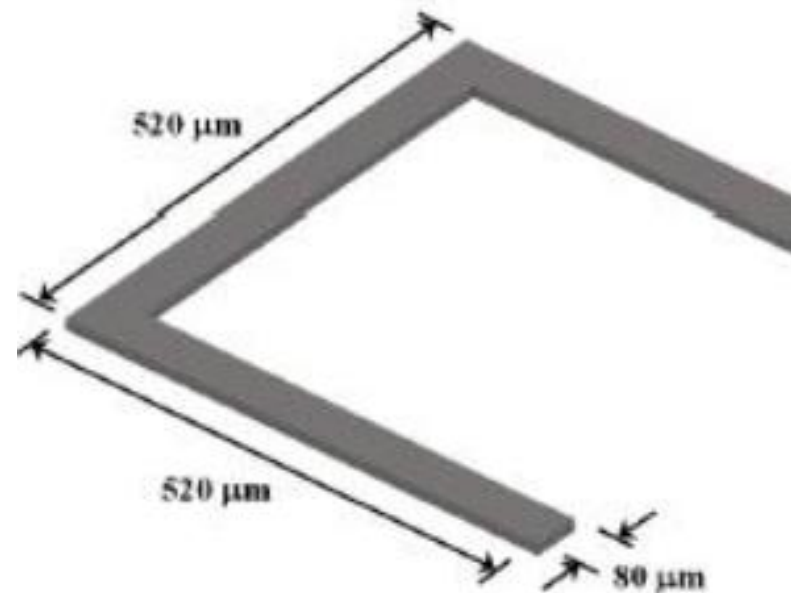
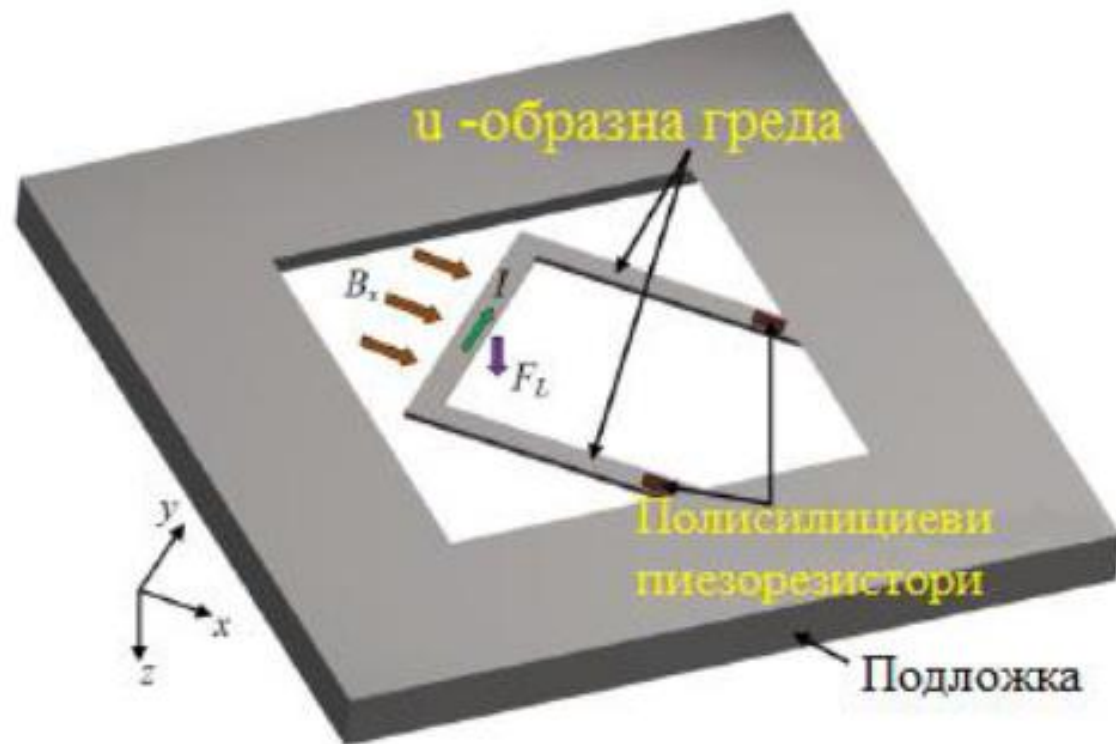
# Приложение на лоренцова сила в MEMS



Деформацията на конзолната рамка се измерва с помощта на четири пиезореzystора, свързани в уитстонов мост. Два от четирите пиезореzystори са пасивни, защото те не реагират на деформацията на рамката.

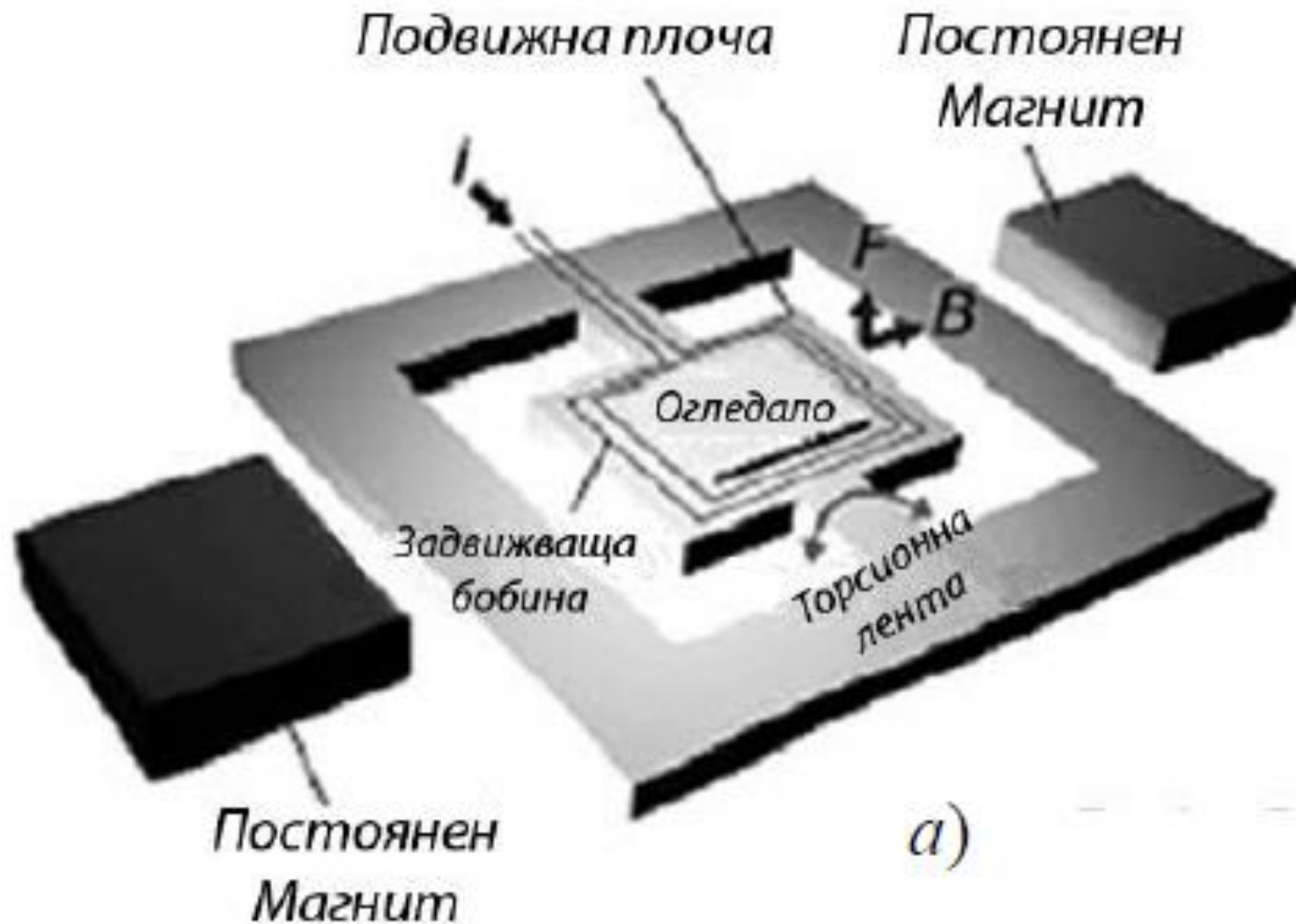


# Приложение на лоренцова сила в MEMC



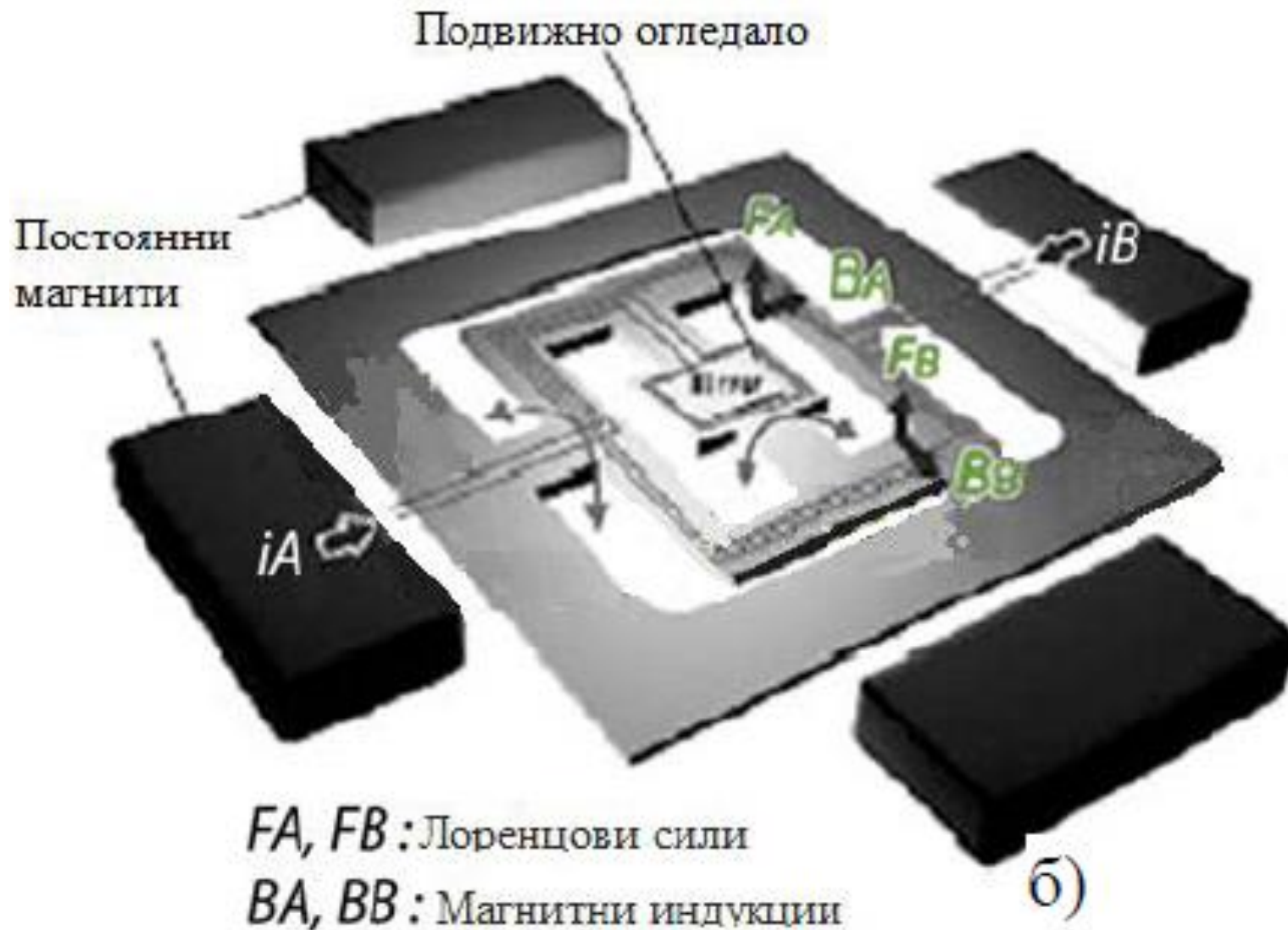
MEMC резонансен сензор с рамка върху конзола. Микрогредите съдържат алуминиева бобина с 80 намотки (непоказани на фигурата). Деформацията на гредата се измерва с два полисилициеви пиезорезистора, свързани в уитстонов мост.

# Приложение на лоренцова сила в MEMS



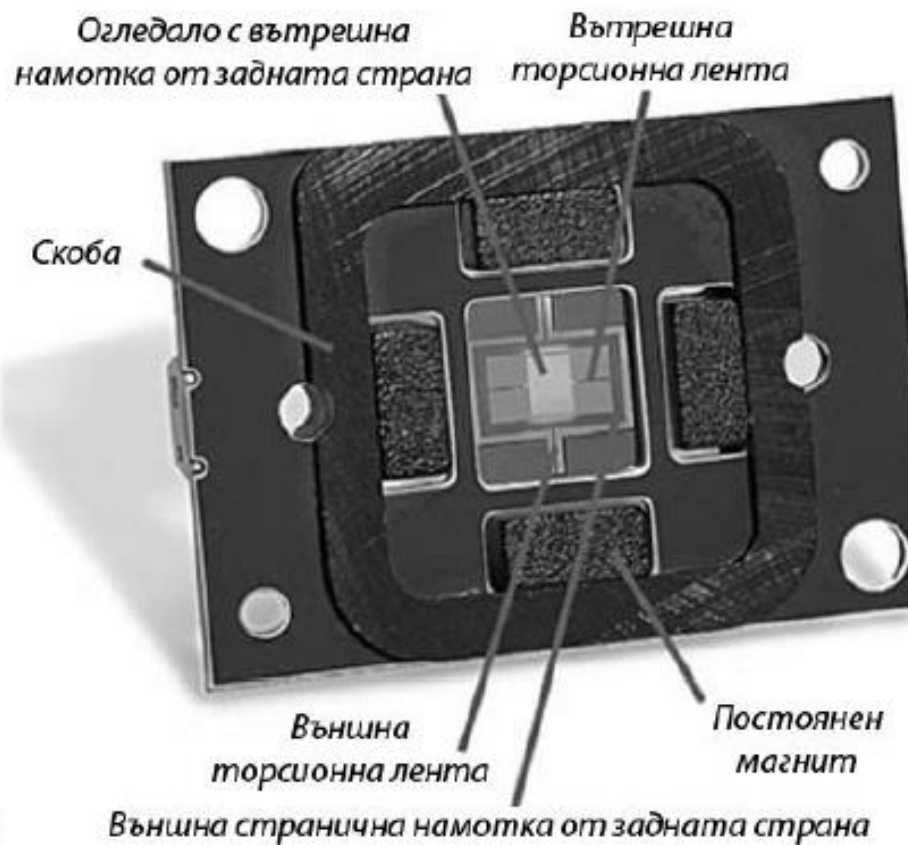
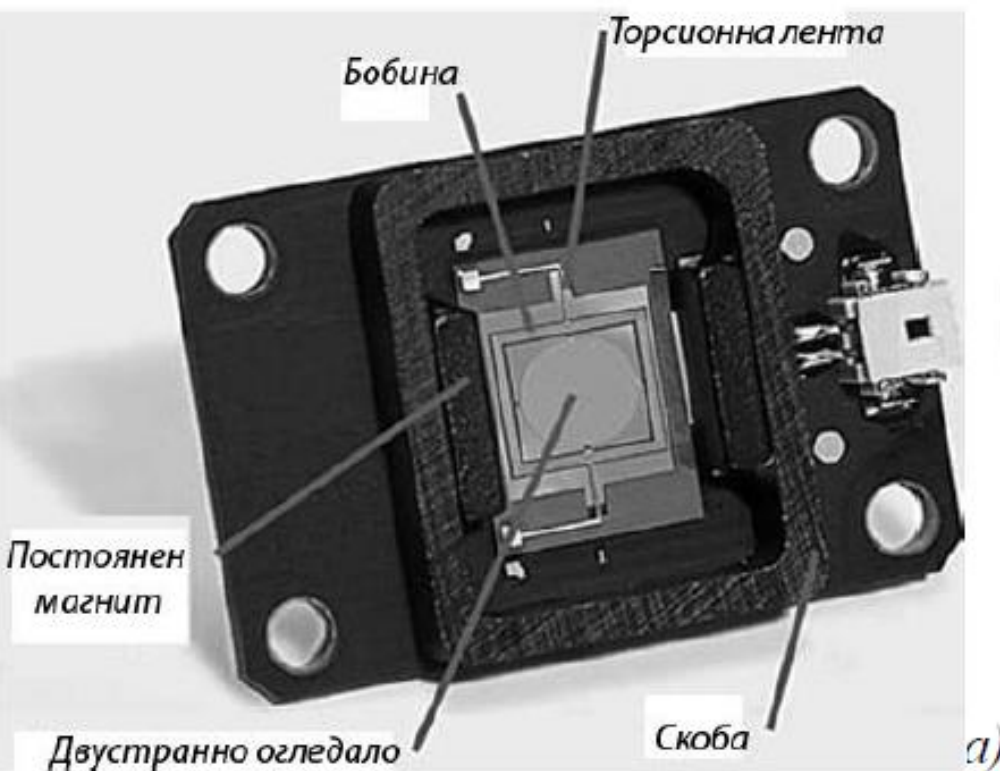
**Eco Scan** MEMS резонансно огледало с една степен на свобода

# Приложение на лоренцова сила в MEMS

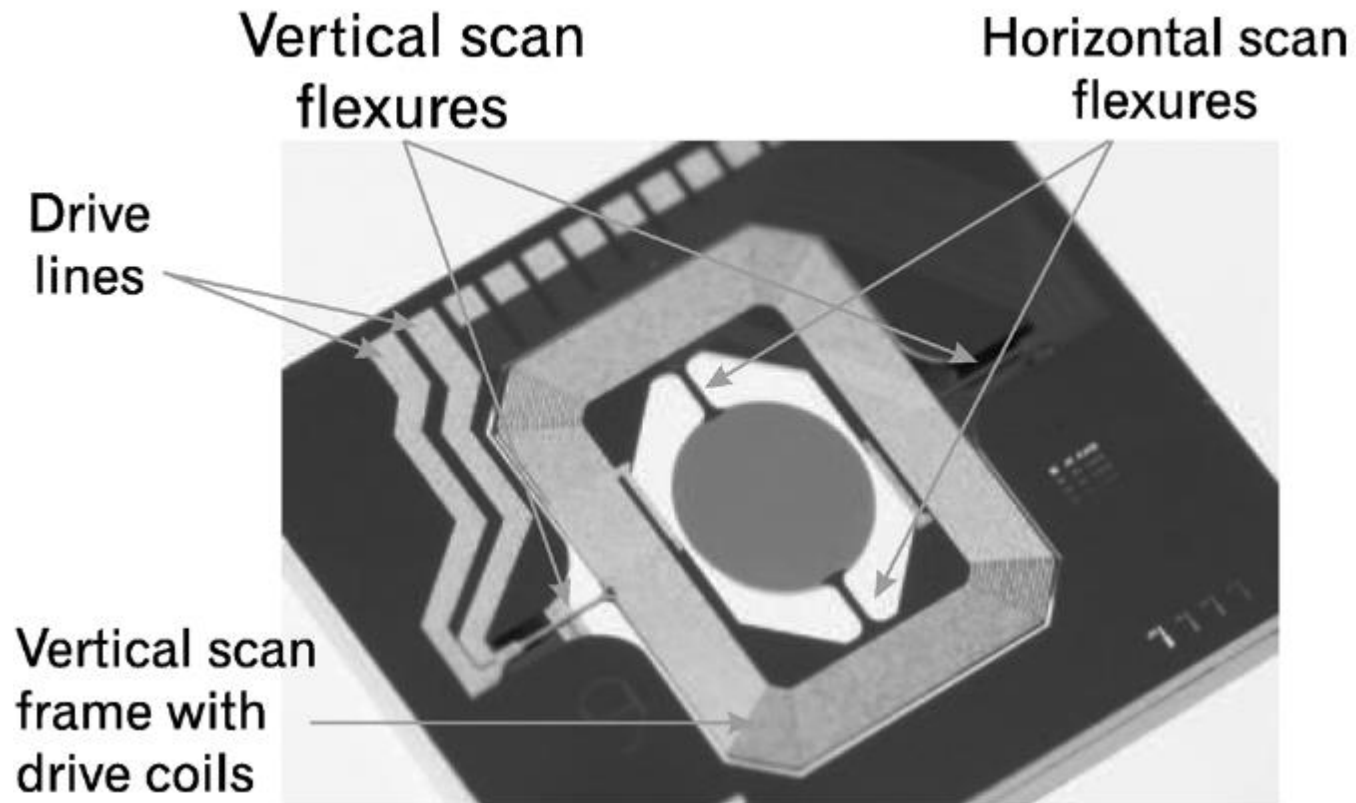


*Eco Scan* MEMS резонансно огледало с две степени на свобода

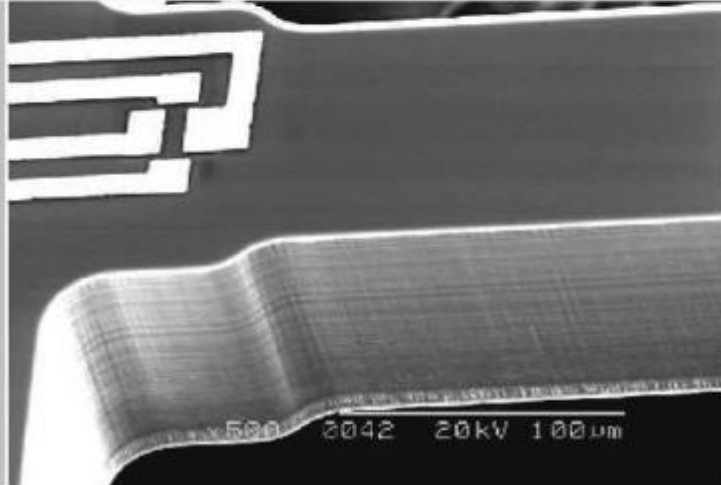
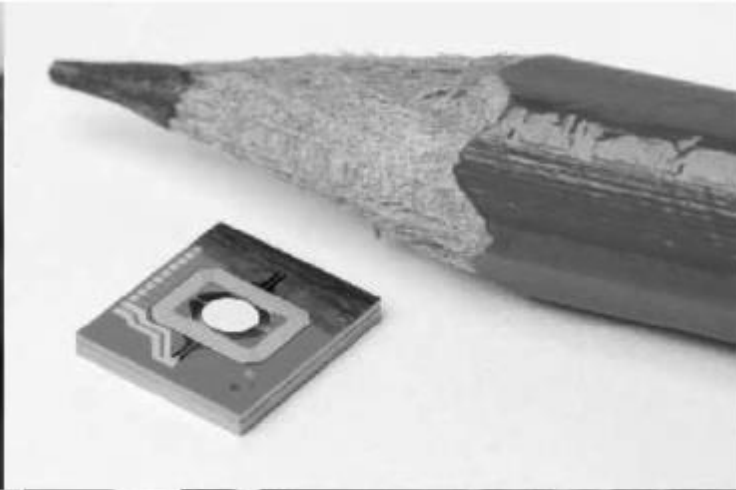
# Приложение на лоренцова сила в MEMS

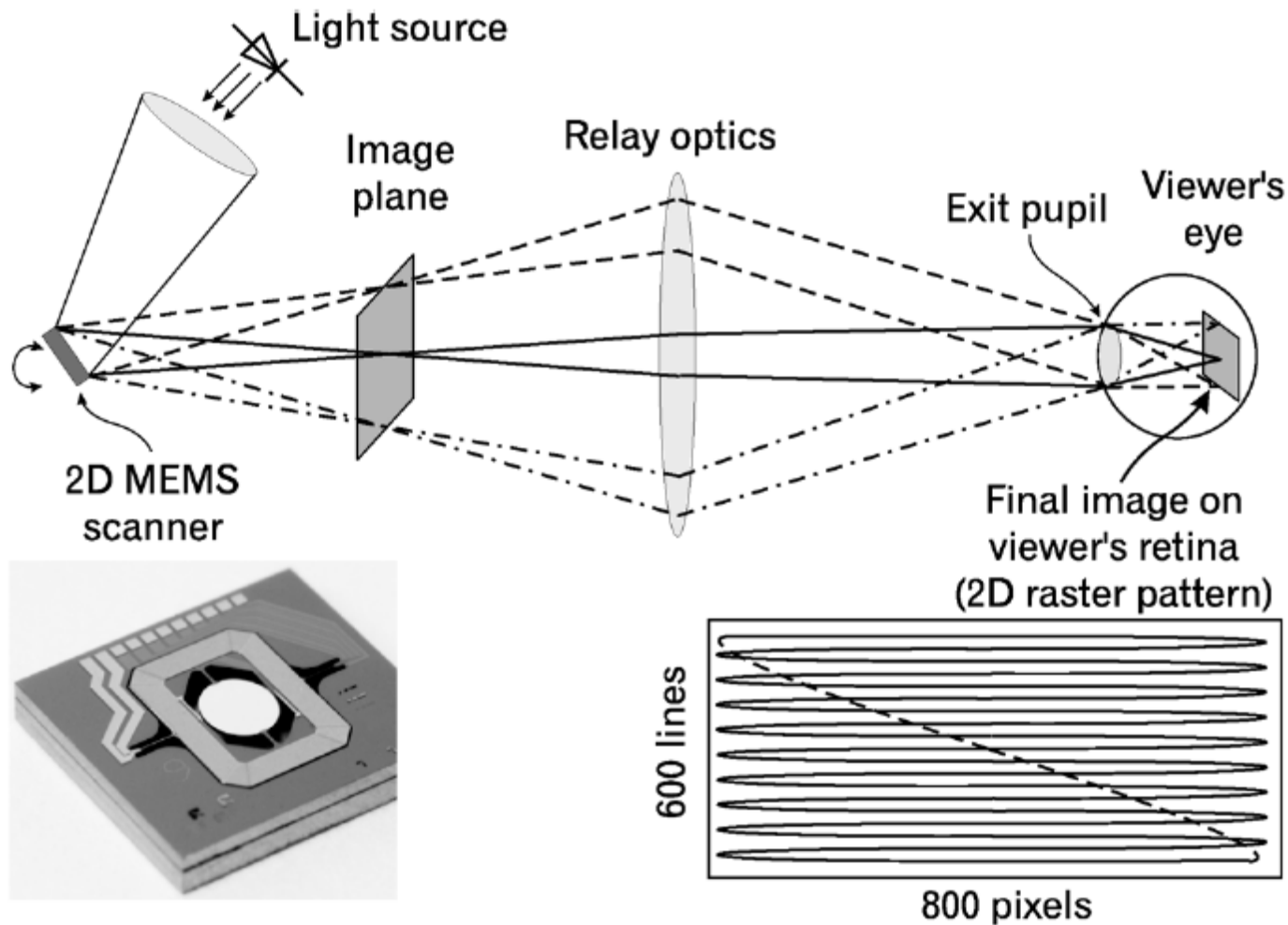


**Eco Scan** MEMS резонансни огледала с една и две степени на свобода (работни образци )

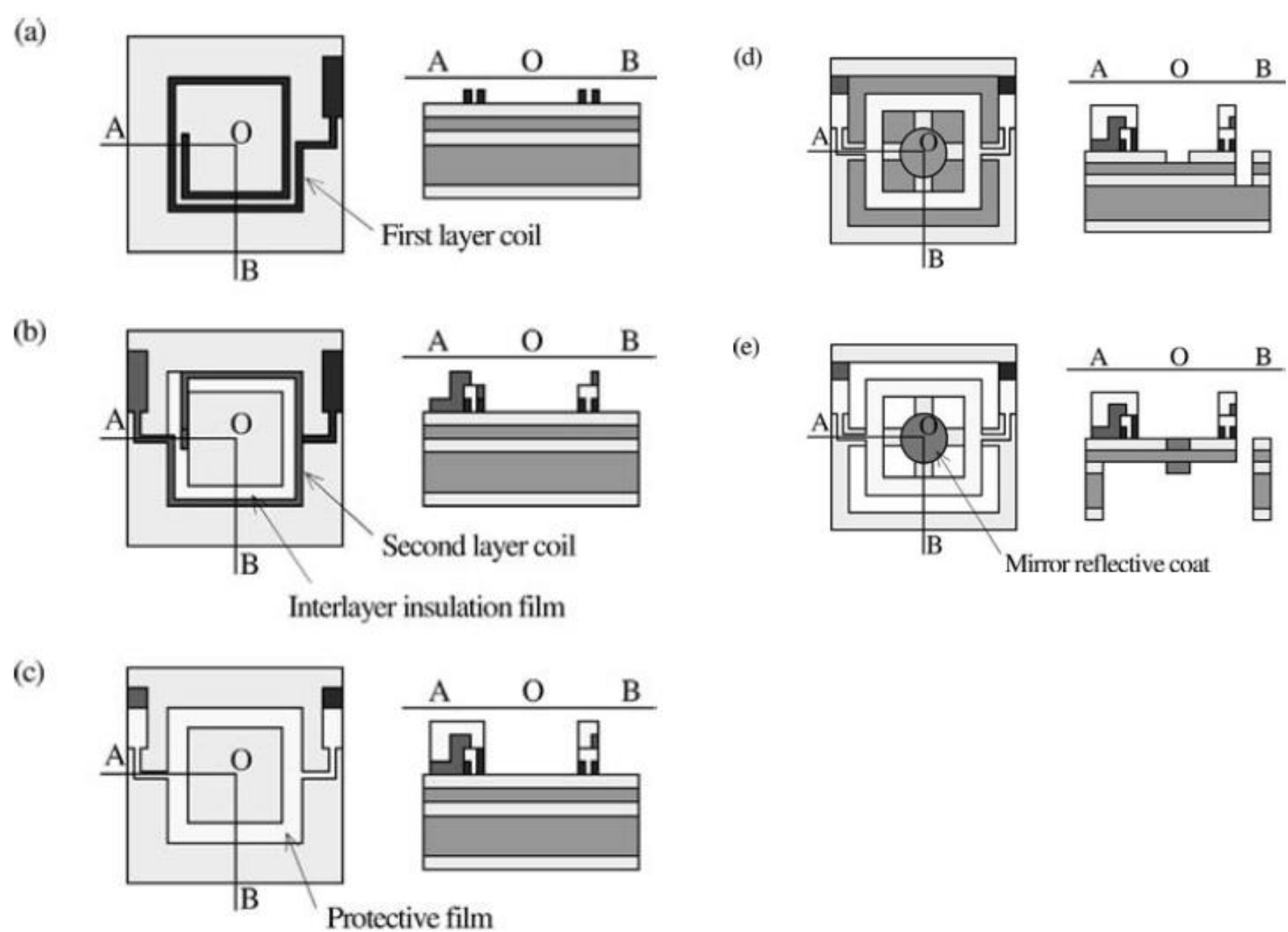


Two-Axis Electromagnetic Microscanner for High Resolution Displays  
Arda D. Yalcinkaya, Hakan Urey, Dean Brown, Tom Montague, and Randy Sprague  
Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 15, no. 4, 2006





RSD – retinal scanning beam display. Изходящата картина върху ретината е 2D рестерен шаблон





Размери на огледалото [mm]	Резонансна честота [kHz]	Амплитуда (оптичен ъгъл)
0.75x0.5	33.5	$\pm 6^\circ$
5x6	0.5	$\pm 34^\circ$
5x10	1.2	$\pm 10^\circ$
4x4	1	$\pm 18^\circ$
4x4	2	$\pm 12^\circ$
4x4	4	$\pm 6^\circ$
4x4	8	$\pm 3^\circ$
3.5x2.2	16	$\pm 2^\circ$

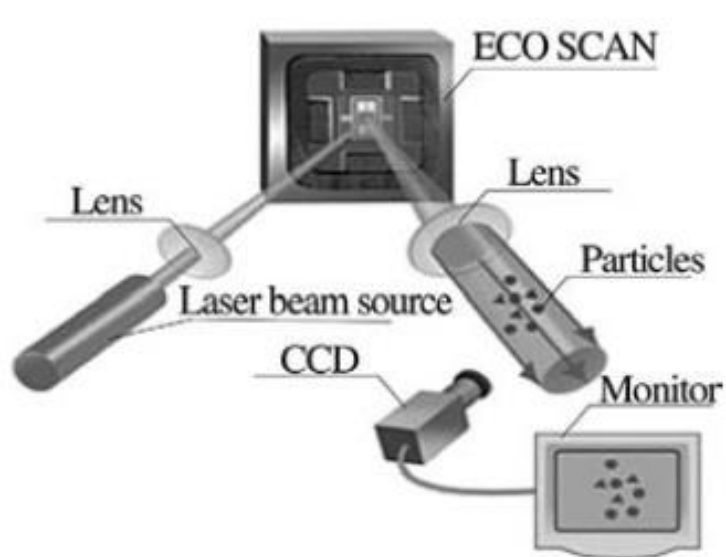


Figure 10.18 Visualization of particles floating in the air.

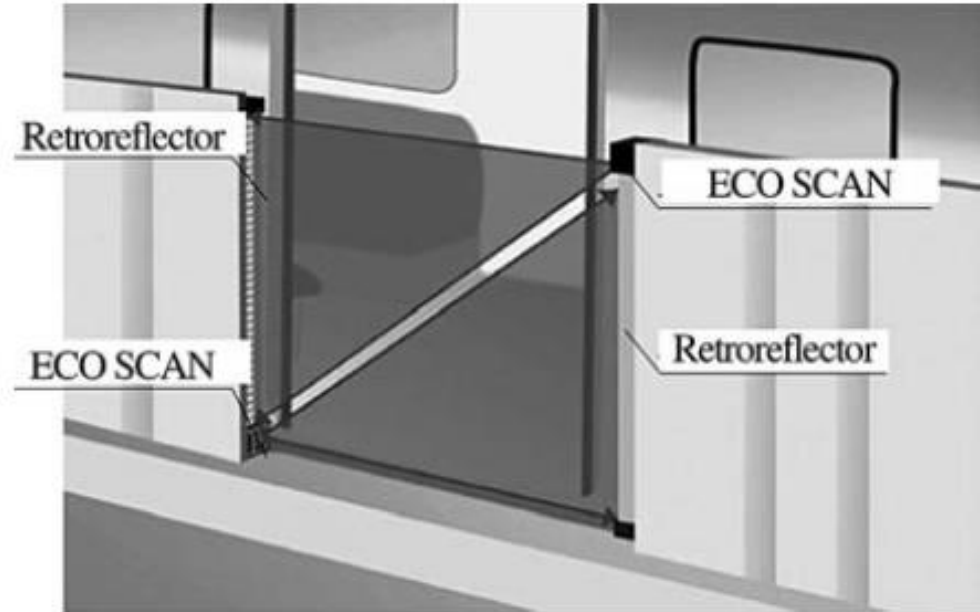


Figure 10.20 Blocking-type area sensor.

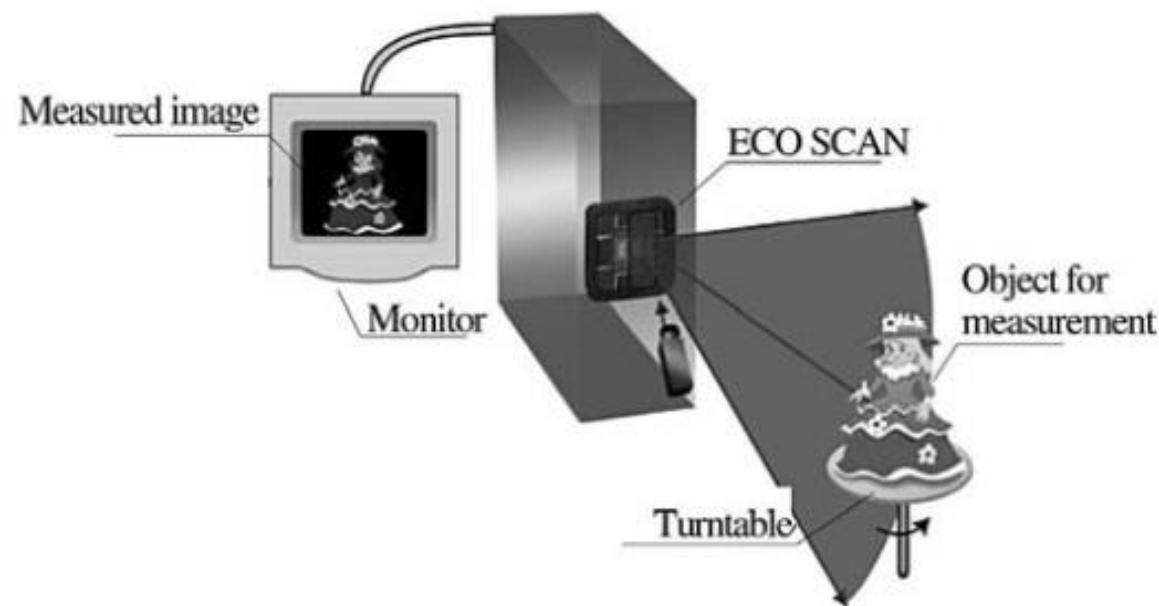
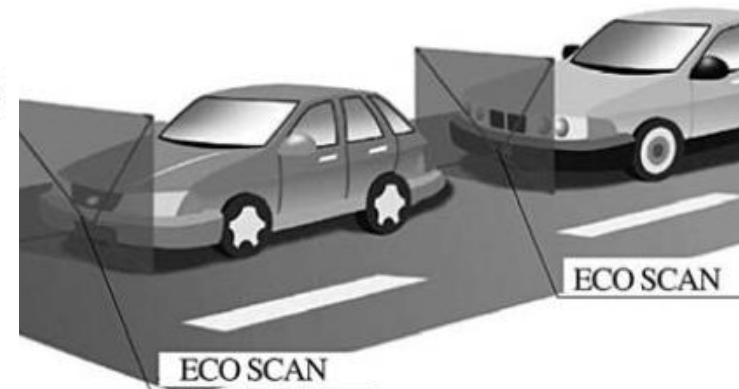


Figure 10.19 Measurement of shapes of objects.



10.21 Vehicle-mounted laser radar.

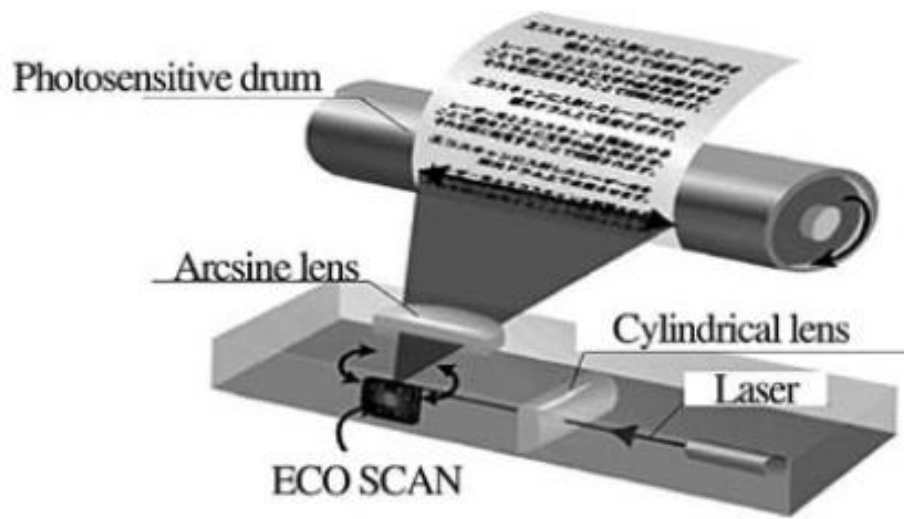


Figure 10.22 Laser printer.

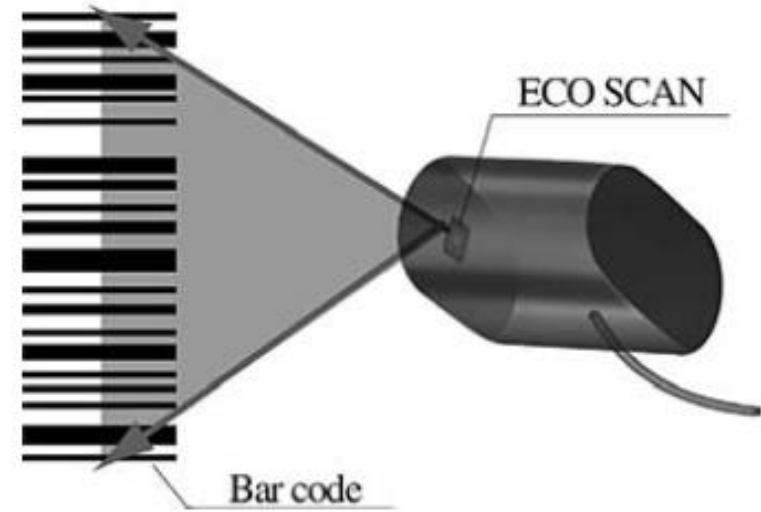


Figure 10.23 Barcode reader.



Figure 10.24 Ranging sensor.

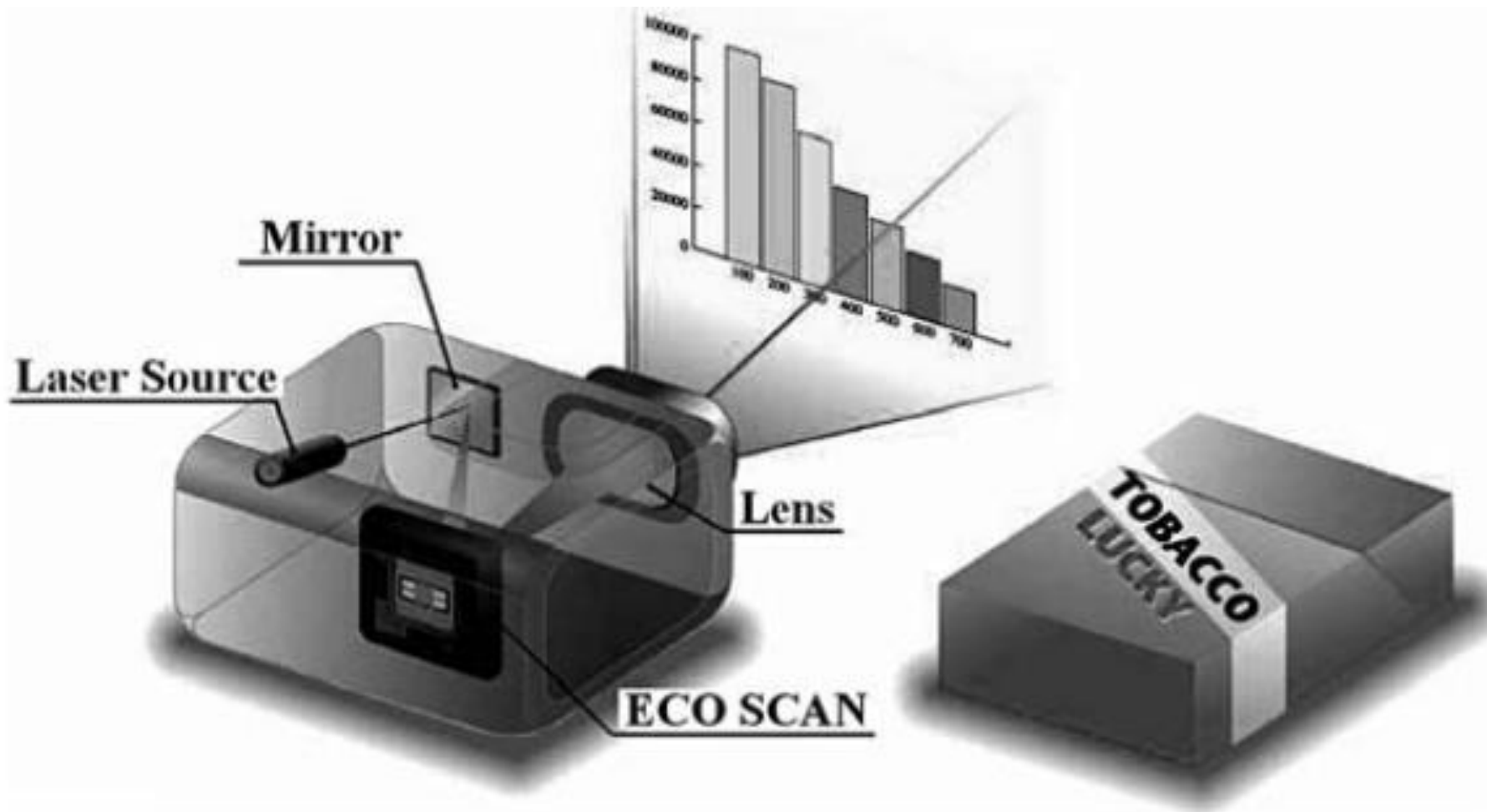


Figure 10.25 Laser display: mobile projector.

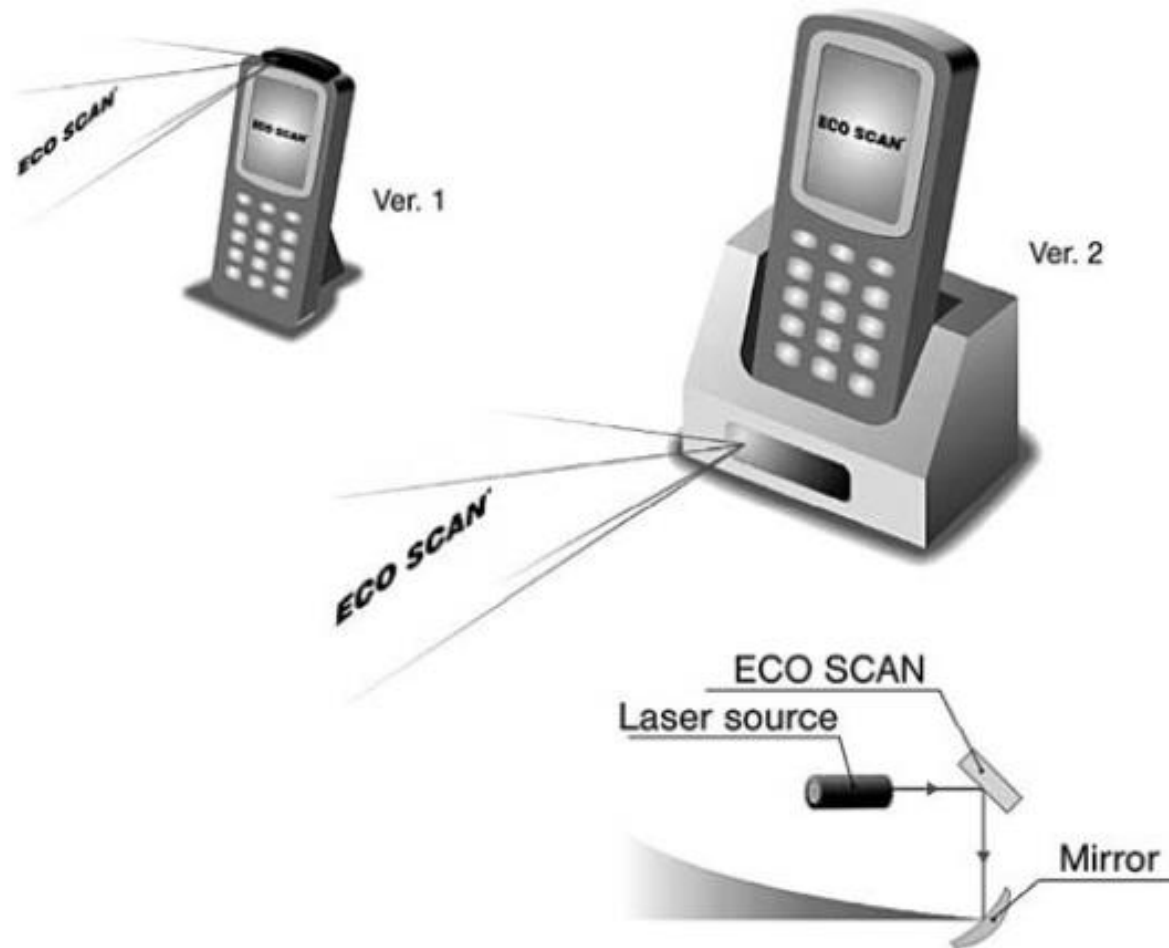
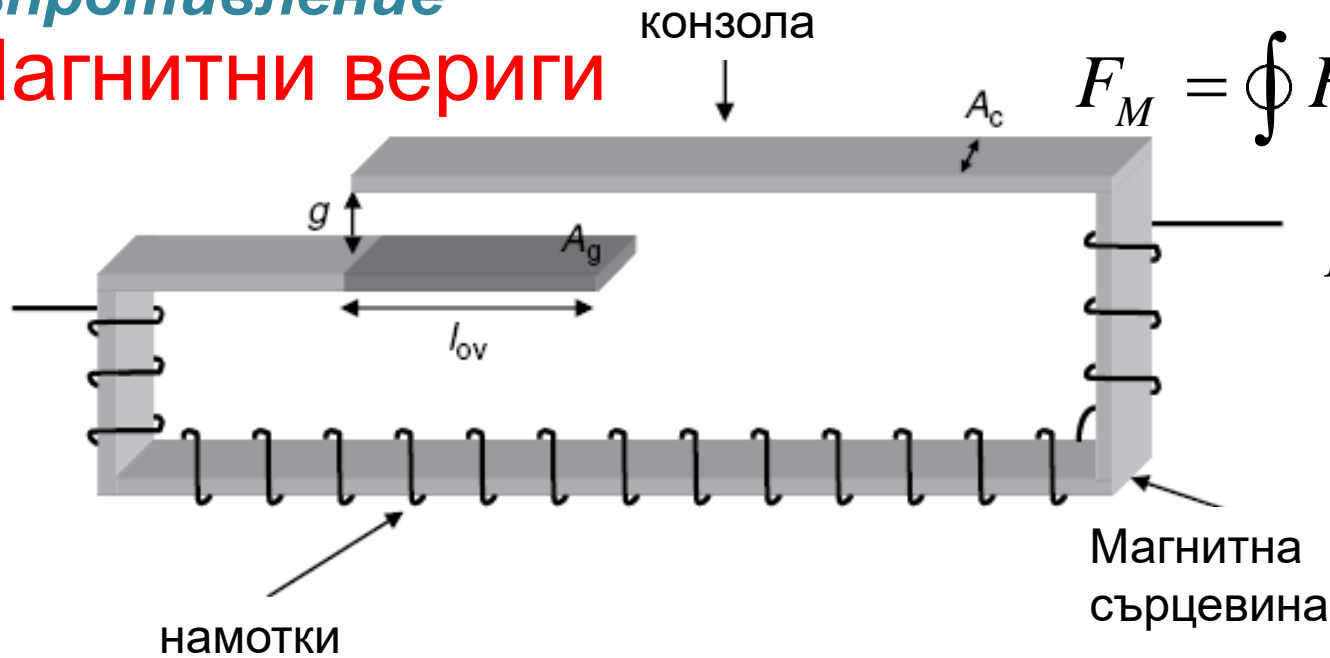


Figure 10.26 Laser display: mobile projector with cell phone.

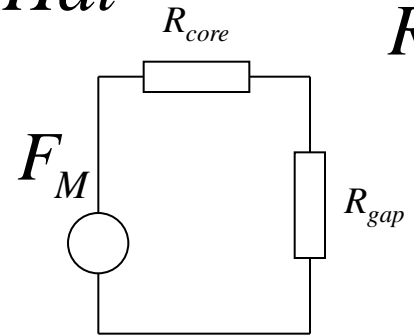


# MEMS актуатори, базирани на промяна на магнитното съпротивление

## Магнитни вериги



$$F_M = \oint H dl \quad \Phi = \frac{F_M}{R_M}$$

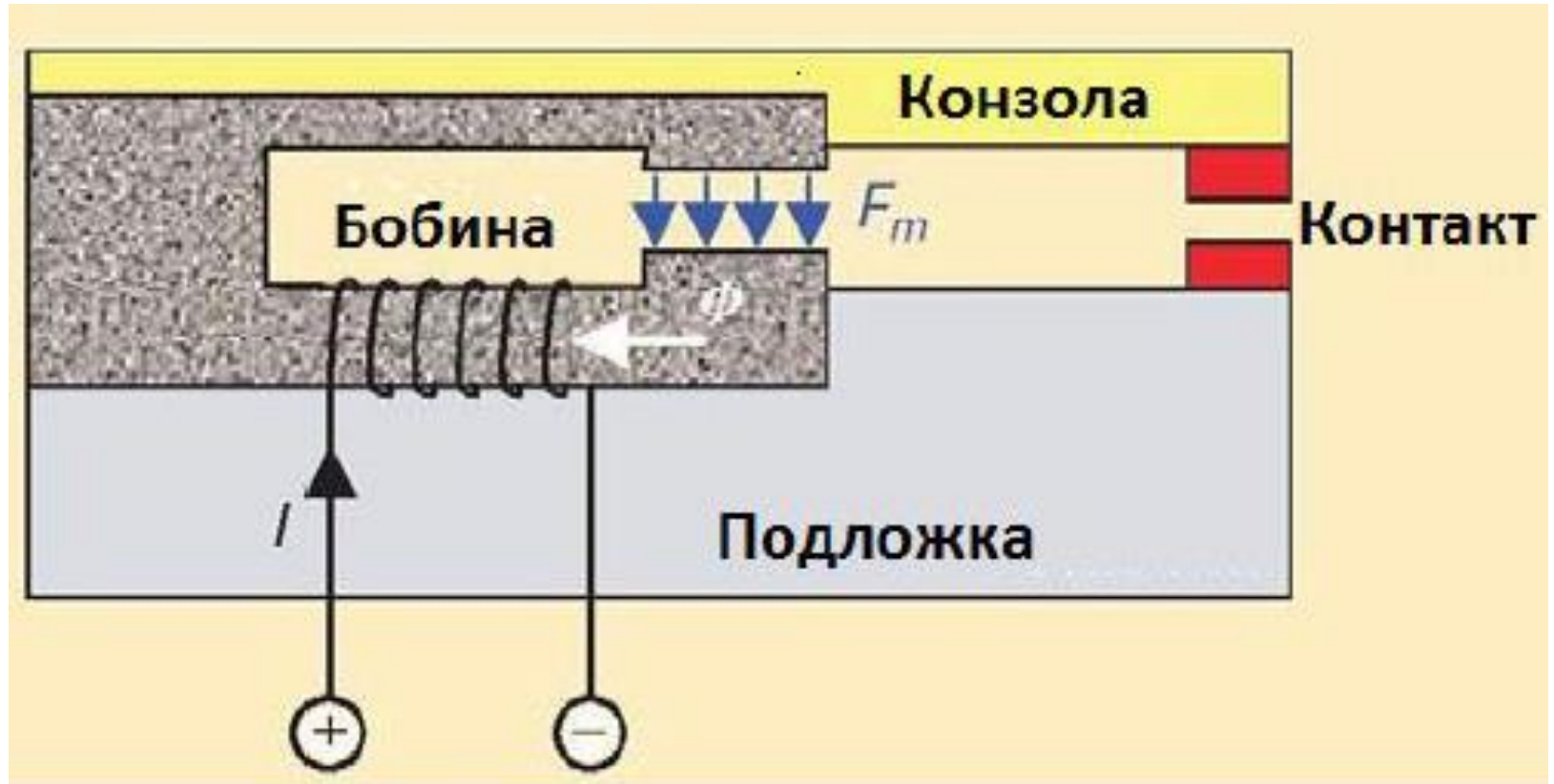


$$R_M = \oint \frac{dl}{\mu A}$$

$$R_{gap}(x) = \frac{(g-x)}{\mu_0 A_g} \quad R_{core} = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad L = \frac{N^2}{R_{gap}(x)}$$

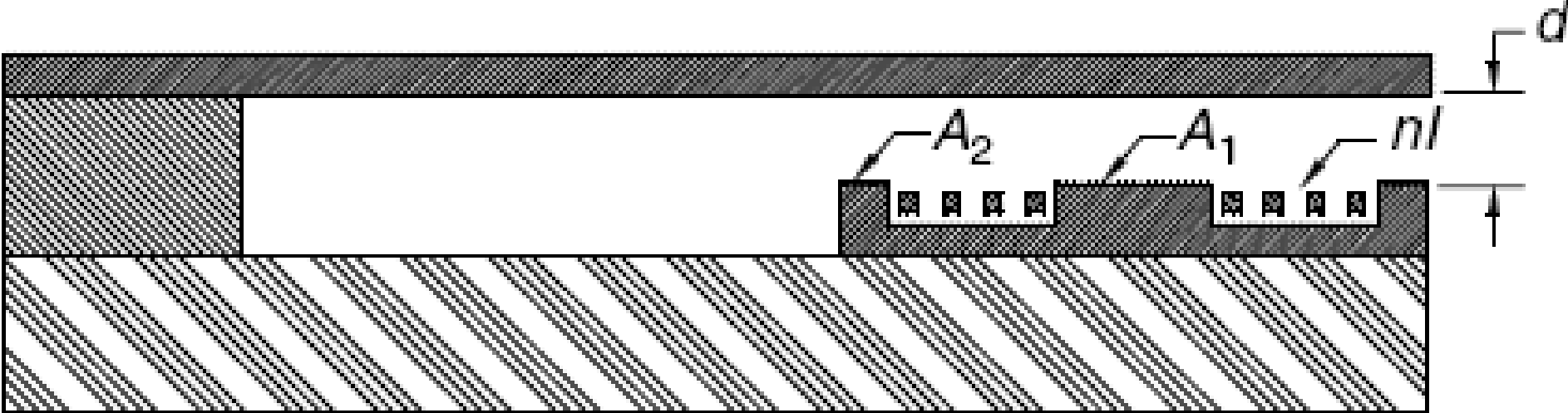
$$W = \frac{1}{2} i^2 L(x) \quad F_x = \frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{A_g}{2\mu_0} \left( \frac{iN\mu_0}{g-x} \right)^2$$

# MEMS актуатори, базирани на промяна на магнитното съпротивление



Приложение на актуатор с променливо магнитно съпротивление за управление на MEMS радиочестотен ключ





Генериране на електромагнитна сила чрез равнинна бобина. Конзолата и сърцевината на бобината са изработени от мек феромагнитен материал. Чрез използване на еквивалентни магнитни вериги електромагнитната сила може да се

изчисли чрез

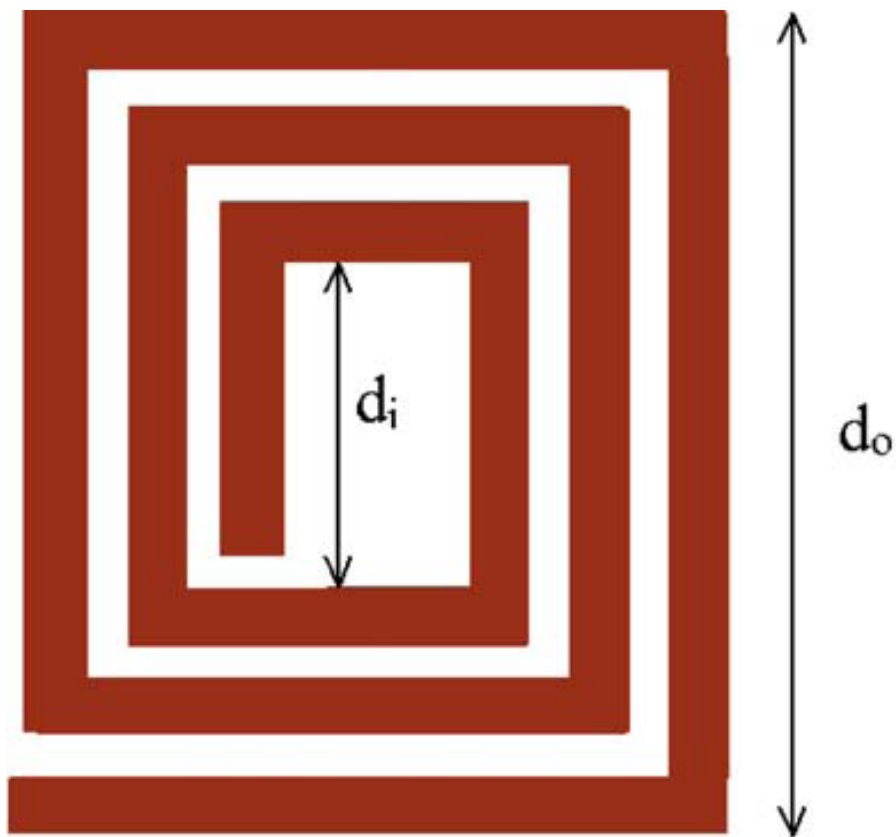
$$F_{\text{mag}} = \frac{2n^2 I^2 (2A_2 + A_1)}{\mu_0 A_1 A_2 (2R_1 + R_2)^2}$$

където

$$R_1 = \frac{d}{\mu_0 A_1} + \frac{h_1}{\mu_0 \mu_r A_1}, \quad R_2 = \frac{d}{\mu_0 A_2} + \frac{h_1}{\mu_0 \mu_r A_2} + \frac{h_2}{\mu_0 \mu_r A_b}$$

са магнитни съпротивления;  $h_1$  и  $h_2$  са дължини на магнитните потоци в горния и долен слой от пермалой.

# Микро-изработка на квадратна спирална бобина



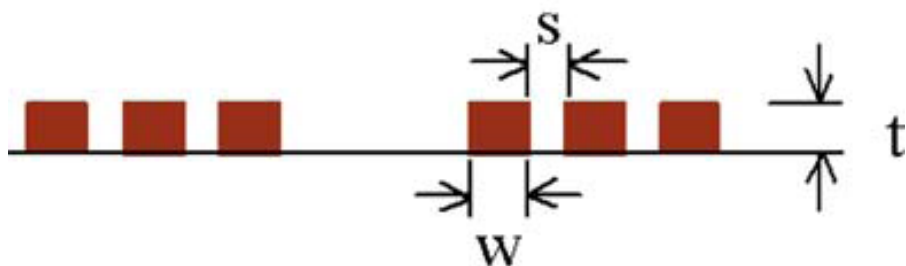
$$L_{MT} = 2(d_o + d_i)$$

$$A_{\text{wire}} = w^2 = \frac{(d_o - d_i)^2}{(2N - 1)^2}$$

$$R_c = \frac{2\rho_{\text{cu}}(d_o + d_i)}{(d_o - d_i)^2} \times$$

$$\times (4N^3 - 4N^2 + N)$$

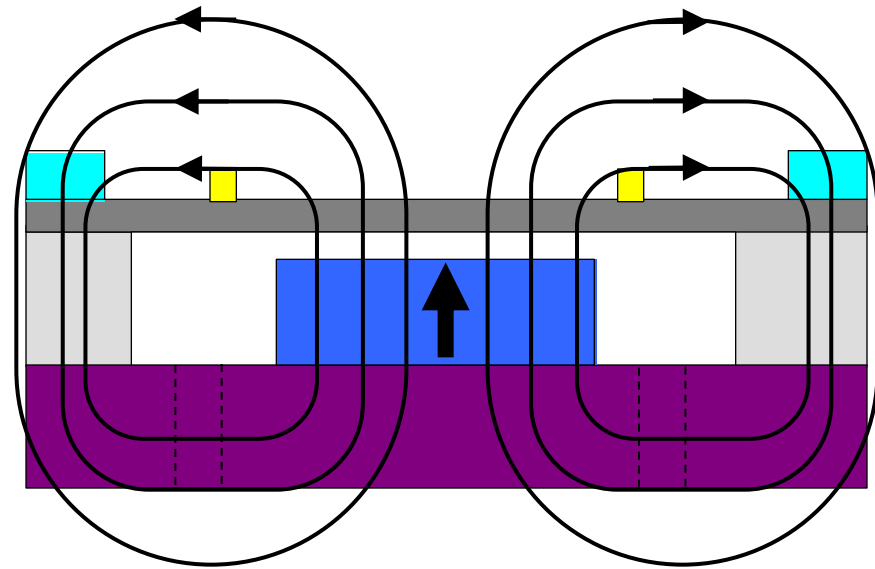
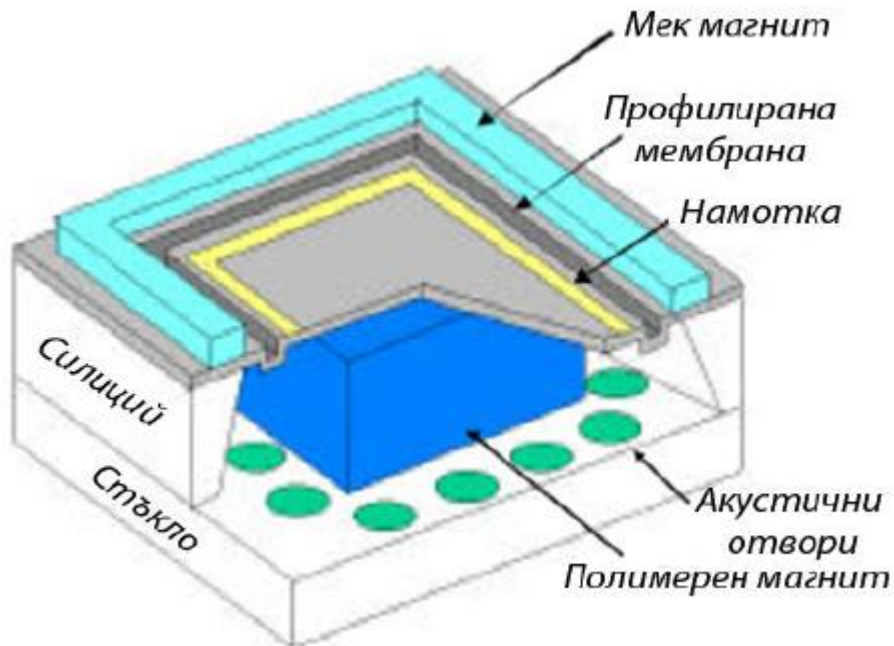
$$s = 1 \text{ to } 2 \mu\text{m} \quad w = 1 \mu\text{m}$$



# Електродинамични MEMC

Електродинамичните MEMC са индукционни системи, в които поне един електрически контур се премества във външно магнитно поле.

- Задвижване чрез краевия полет
- Обемна микро-обработка
  - Мембрана – силициев нитрид; Галванично изработена медна бобина; NdFeB постоянен магнит (обемен)



## Електродинамичен високоговорител

# Електродинамични MEMS

Законът на Фарадей (Michael Faraday, 1791 – 1867), който гласи, че нарастването на напрежението  $de$  за елементарна дължина  $dl$  по посока на електрическия поток, индуцирано от движението на бобината е

$$de = \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

върху преместваща се в електромагнитно поле (електрическо поле и магнитна индукция) заредена частица действа лоренцова сила

$$d\vec{f} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

за елементарна дължина от една навивка на бобината  $dl = r d\theta$  се определя нарастването на напрежението

$$de = \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{l} - v B r d\theta$$

Ако магнитната индукция е постоянна, чрез интегриране се намира насоченото по направление на тока напрежение

$$e = 2\pi N r B v = K_e v \quad K_e = 2\pi N r B \quad \text{константа на преобразуване}$$

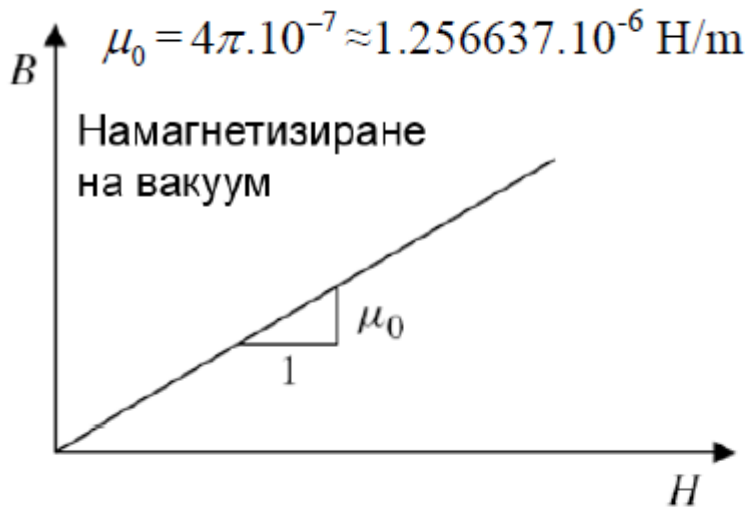
Лоренцовата сила е  $f = -i 2\pi N r B = -K_e i$

Коенергията на индуцираното напрежение е

$$W_m^*(x, i) = -K_e i (x - x_0)$$

където  $x$  е обобщената механична координата, а  $x_0$  е началната ѝ стойност.

# Постоянни магнити и магнитни материали



а)



б)



в)



г)

Магнитните материали се класифицират в зависимост от тяхната крива на намагнитване, която дава зависимостта на магнитната индукция  $B$  [Т] от интензитета на магнитното поле  $H$  [А/м]

# Постоянни магнити и магнитни материали

$$B = \mu_0 H + M = \mu_r \mu_0 H$$

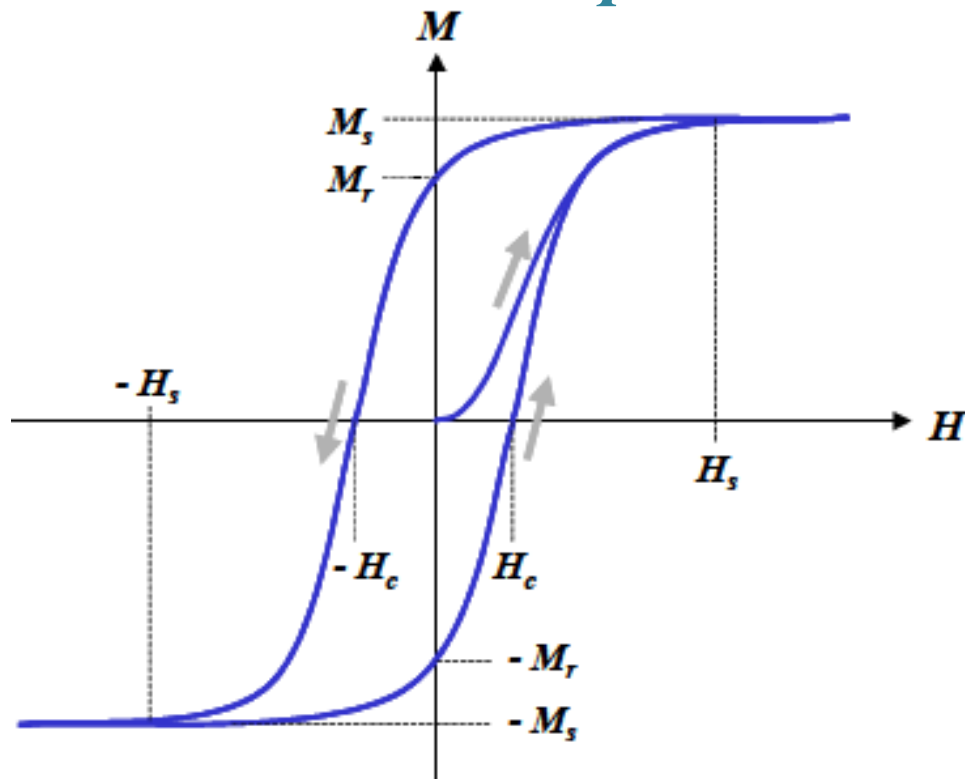
$M$  [Т] - намагнитеност на материала

Магнитна възприемчивост

$$\chi = \frac{M}{H}$$

Относителна магнитна проницаемост

$$\mu_r = \frac{\chi}{\mu_0} + 1$$

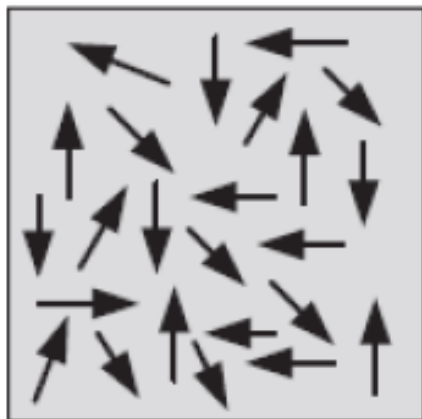


Когато феромагнитен материал е подложен на намагнитване последвано от размагнитване с различен знак следва хистерезис. Хистерезисната крива се характеризира с наситена намагнитеност  $M_s$ , и остатъчна намагнитеност  $M_r$ , коерцитивност  $H_c$ , интензитет на насищане  $H_s$ . С тези параметри феромагнитните материали се подразделят на магнитно меки – с малка коерцитивност и нисък интензитет на насищане (NiFe т.е. пермалой, съдържащ 81% Fe и 19% Ni) и магнитно твърди – голяма коерцитивност и висок интензитет на насищане. Използваните магнитно твърди материали в MEMS са базирани на кобалтови сплави с P, As, Sb, Bi, W, Cr, Mo, Pd, Pt, Ni, Fe, Cu, Mn, O и H. Създадените през 1983 г. NdFeB сплави проявяват забележителни свойства на твърди магнити с една от най-високите плътности на енергия от  $0.4 \text{ MJ/m}^3$ .

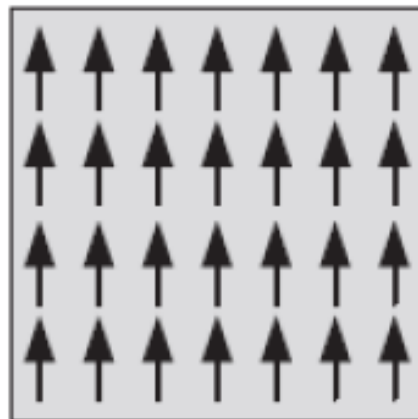
# Постоянни магнити и магнитни материали

Категория материали	$\chi/\mu_0$	Примери
Ферромагнитни	от $10^7$ до $10^2$	Ni, Fe, Co, NiFe, NdFeB
Феримагнитни	от $10^4$ до $10^1$	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , ферити, гранат
Антиферромагнитни	малка	MnO, NiO, FeCO <sub>3</sub>
Парамагнитни	от $10^{-3}$ до $10^{-6}$	Al, Cr, Mn, Pt, Ta, Ti, W
Диамагнитни	от $-10^{-6}$ до $-10^{-3}$	Ag, Au, C, H, Cu, Si, Zn
Супер проводници	-1	YbBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>

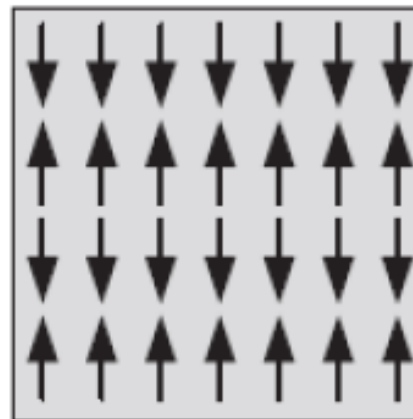
Парамагнити



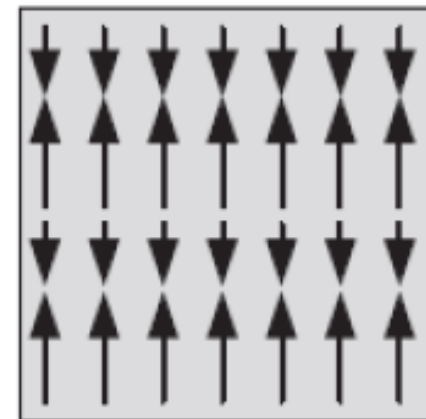
Феромагнити



Антиферромагнити

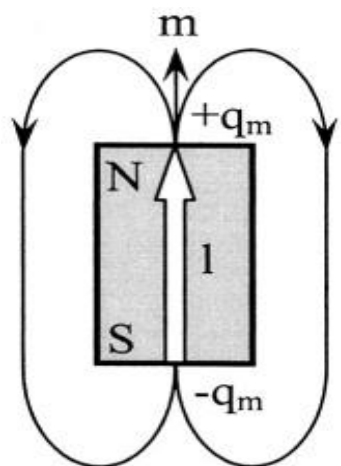


Феримагнити

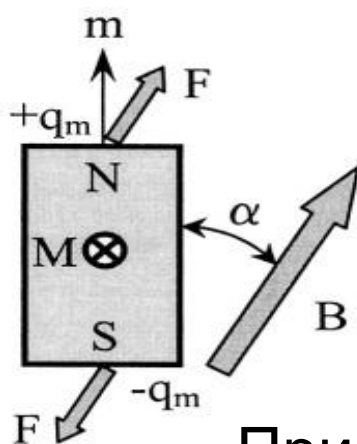


# Постоянни магнити и магнитни материали

## Магнитен диполен момент



(a)



(b)

$$\vec{m} = q_m \vec{l}$$

$q_m$  – изолиран магнитен товар  
или сила на полюса

При въздействие на външно магнитно поле се появява момент

$$\vec{F} = q_m \vec{B}$$

$$M = q_m l B \sin \alpha$$

$$M = Fl \sin \alpha$$

$$m = M_m A l$$

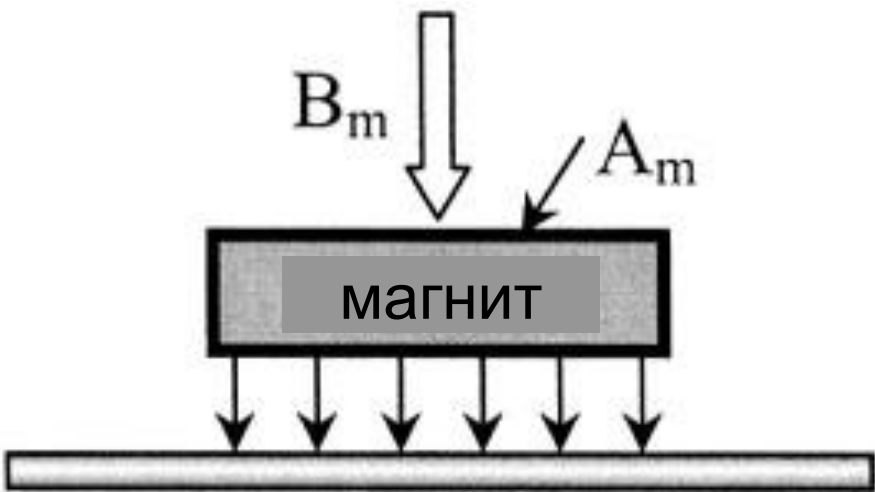
Намагнетизиране на магнита

$$M_m = B_m (\mu_r - 1) / (\mu_0 \mu_r)$$

$$\Rightarrow q_m = B_m A (\mu_r - 1) / (\mu_0 \mu_r)$$



# Постоянни магнити и магнитни материали



ферромагнитна повърхнина

$$F = B_m^2 A_m / (2\mu_0)$$

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

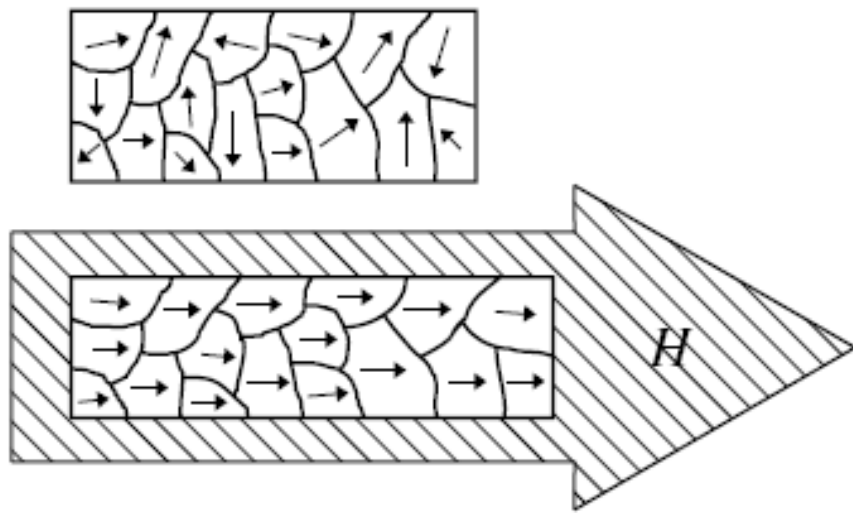
$$\mu = \frac{B}{H} \text{ -магнитна проницаемост [H/m]}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ -относителна магнитна проницаемост}$$

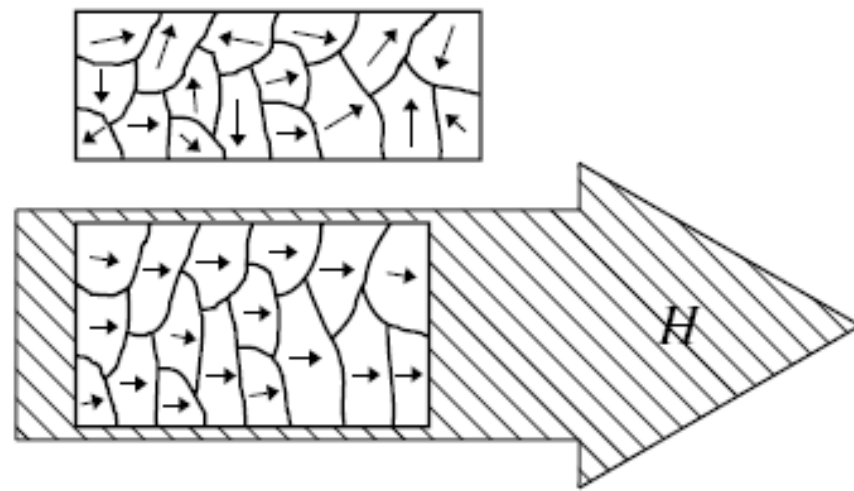
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m} \text{ -магнитна проницаемост на вакуума (магнитна константа)}$$

# Магнитоотрицателни и магнитоеластични MEMS

Магнитоотрицателният ефект (ефект на Джаул 1842 г.) - изменение на линейните размери на феромагнитно тяло при изменение на магнитната индукция. Под влияние на магнитното поле хаотично ориентирани домени (за поликристални структури) и кристали (за феромагнитни материали с кристална структура) се ориентират в направление на магнитните силови линии, което предизвиква изменение на линейните размери на феромагнитното тяло. Магнитоотрицателният ефект може да бъде положителен ( $\Delta l/l > 0$ ) а) или отрицателен ( $\Delta l/l < 0$ ) б).

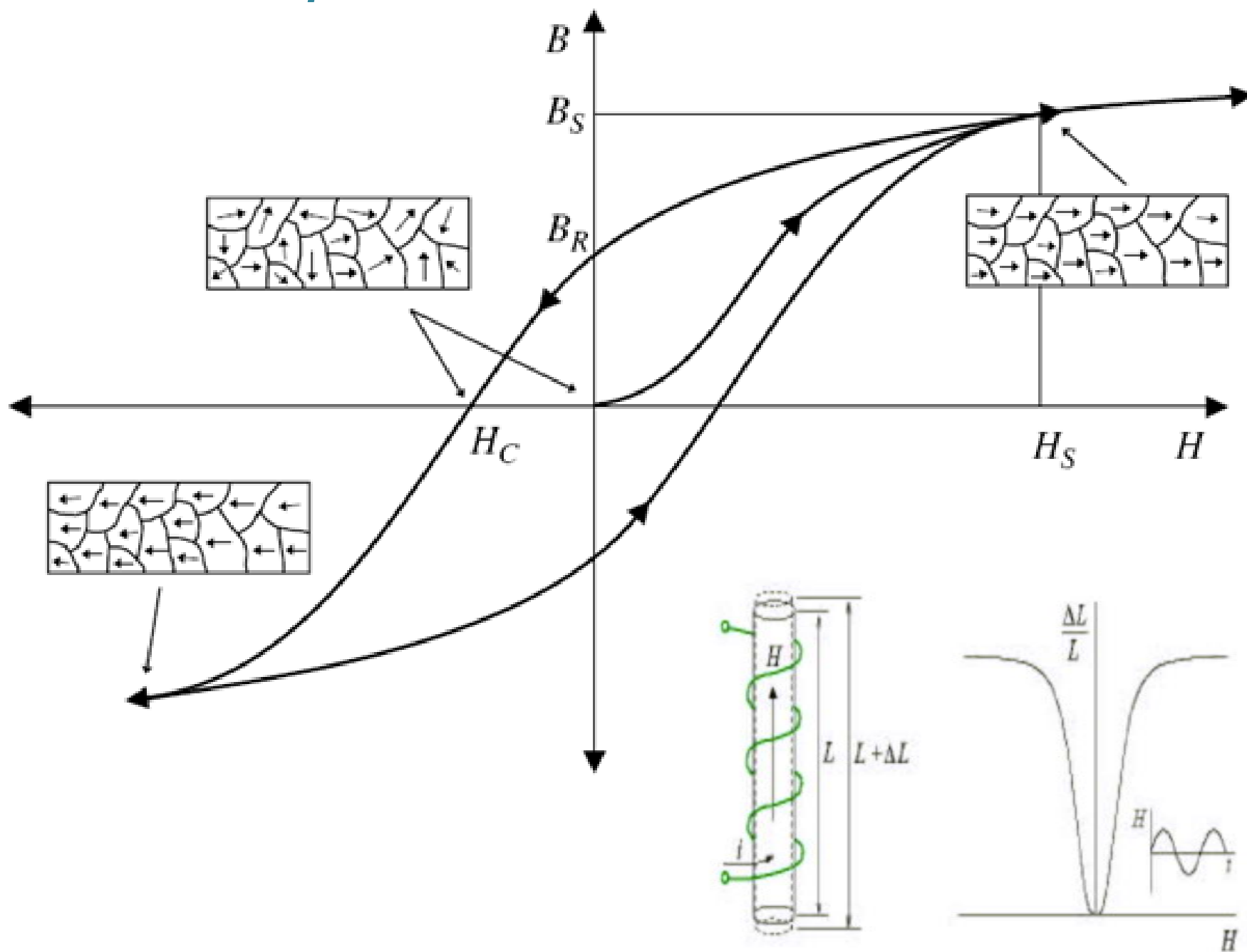


(a)



(b)

# Магнотриктивни и магнитоеластични МЕМС



# Магнитостриктивни и магнитоеластични MEMC

$$S_{ij} = c_{ijkl}^H T_{kl} + d_{mij} H_m + m_{ijkl} H_k H_l$$

$$B_k = d_{kij} T_{ij} + \mu_{km}^T H_m$$

$S_{ij}$  - тензор на относителните механични деформации

$T_{kl}$  -тензор на механичните напрежения

$c_{ijkl}^H$  -механична податливост при  $H=0$

$H_m$  -интензитет на магнитното поле

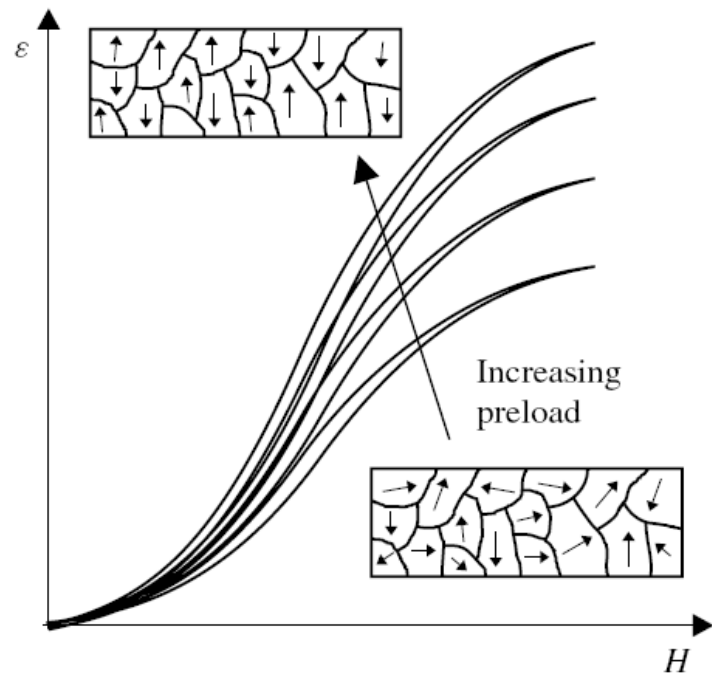
$\mu_{km}^T$  -магн. прон. при постоянно напрежение

$d_{mij}$  -пиеземагнитен коефициент

$m_{ijkl}$  -магнетостриктивен коефициент

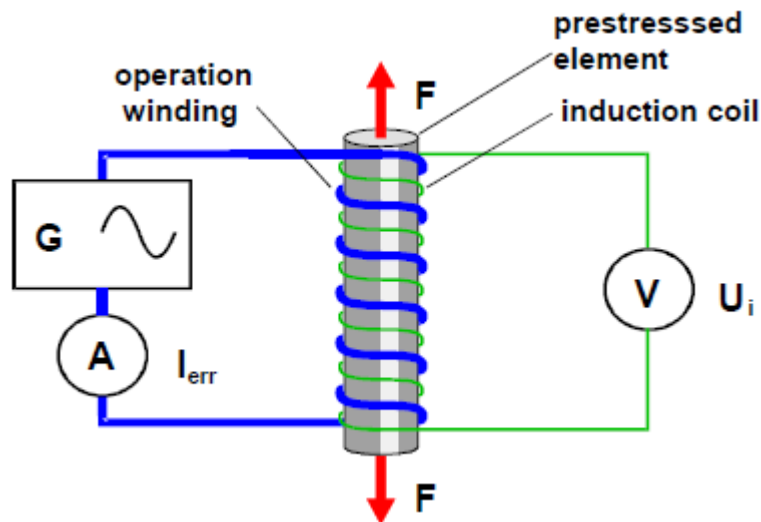
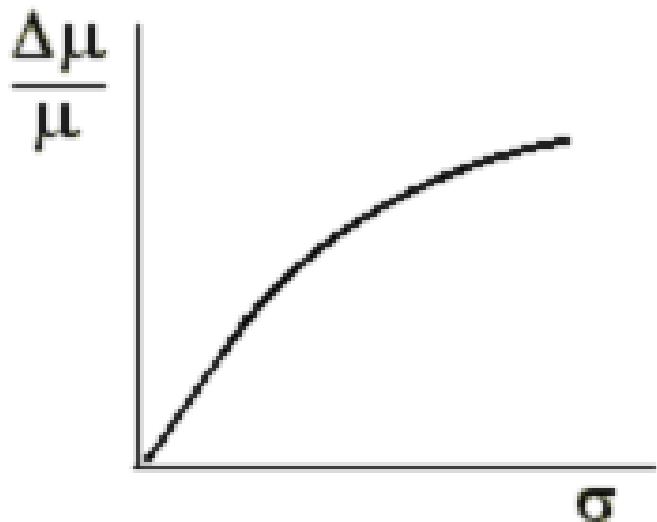
$B_k$  -магнитната индукция

$$S \propto c_1 H + c_2 H^2$$



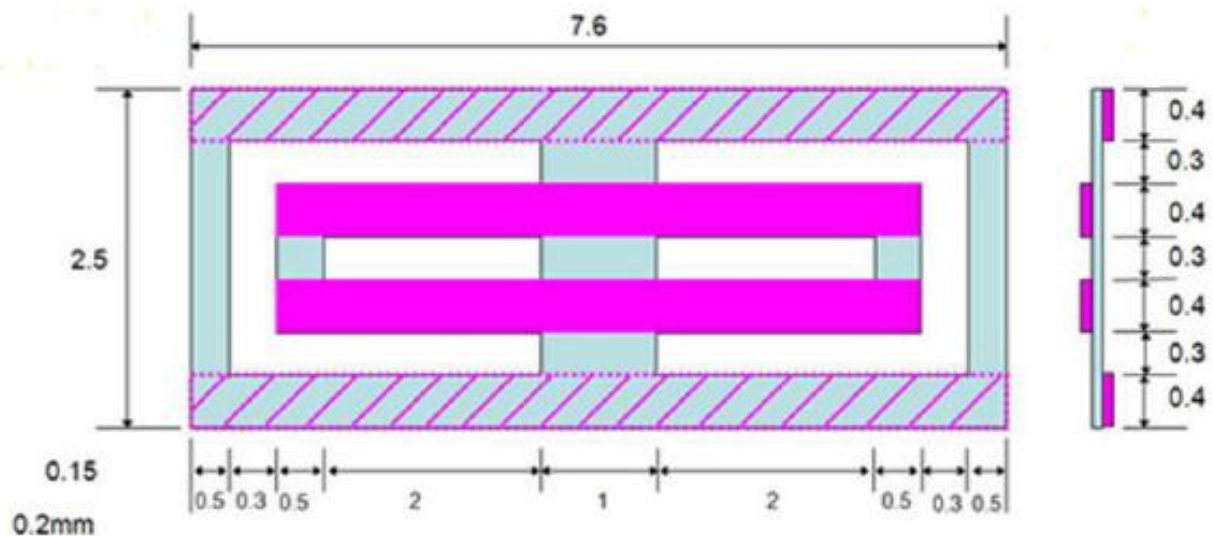
# Магнитоотрикативни и магнитоеластични MEMC



Магнитоеластичността (ефект на Вилари) е обратно на магнитоотрикативното явление. Изразява се в изменение на магнитните свойства (магнитната проницаемост) на ферромагнитен материал под действие на механично напрежение. Промяната на магнитната проницаемост  $\mu$  под действие на механично напрежение води до изменение на магнитното съпротивление  $R$  на бобината, което изменя индуктивността и  $L$ .



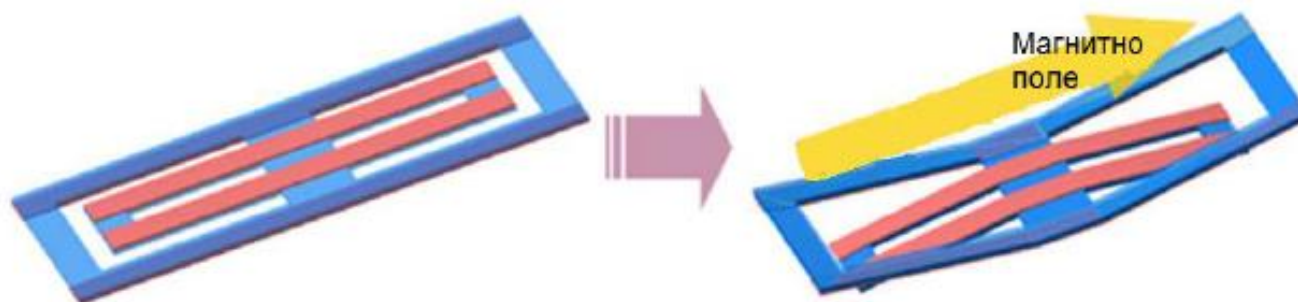
ниска точност грешка 3 – 5% (отстъпват по точност на тензорезисторните преобразуватели на сила, които имат грешка 1,2 – 1,5%); нелинейност 2 – 5%;; “стареят”; минимална измервана сила 250N; голяма чувствителност; надеждността е висока; изходният сигнал не се нуждае от предварително усилване

# Магнитоотриктивни и магнитоеластични MEMC



 NiFe горен слой  
 NiFe долен слой

 Полиамиден филм (Каптон)

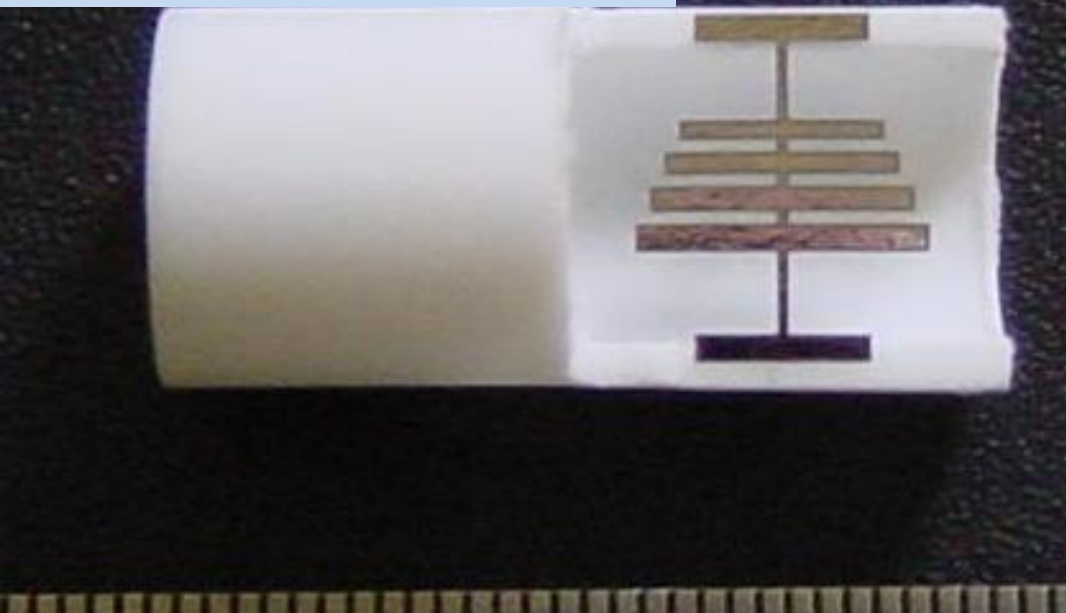


Магнитоотриктивен актуатор, изработен с микротехнология

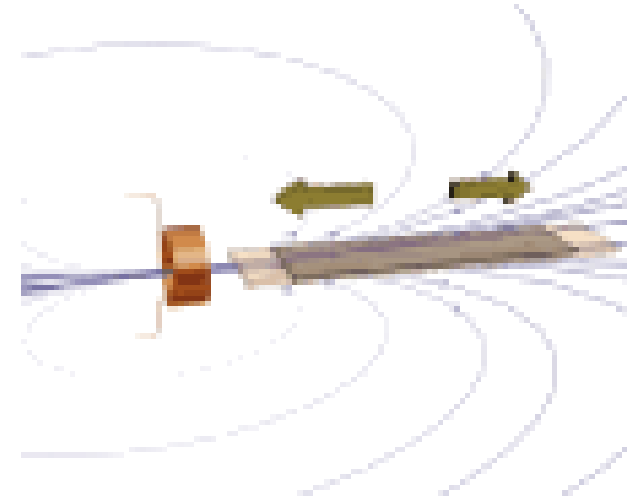
# Видове магнитни ефекти

Прав ефект	Обратен ефект
<b>Магнетострикция на Joule</b> Промяна на размерите по направление на приложеното магнитно поле	<b>Ефект на Villary</b> Промяна на намагнетизирането при поява на механично напрежение
<b><math>\Delta E</math> ефект</b> Магнетоеластичен принос към магнитокристалната анизотропия	----- Магнитно предизвикано изменение на еластичността
<b>Ефект на Wiedemann</b> Създаване на въртящ момент чрез спирална анизотропия	<b>Matteuci ефект</b> Създаване на анизотропия и е.м.с. чрез въртящ момент
<b>Магнитообемен ефект</b> Промяна на обема в следствие на намагнетизиране (близо до температурата на Curie)	<b>Nagaoka-Honda ефект</b> Промяна на магнитното състояние в следствие на промяна на обема

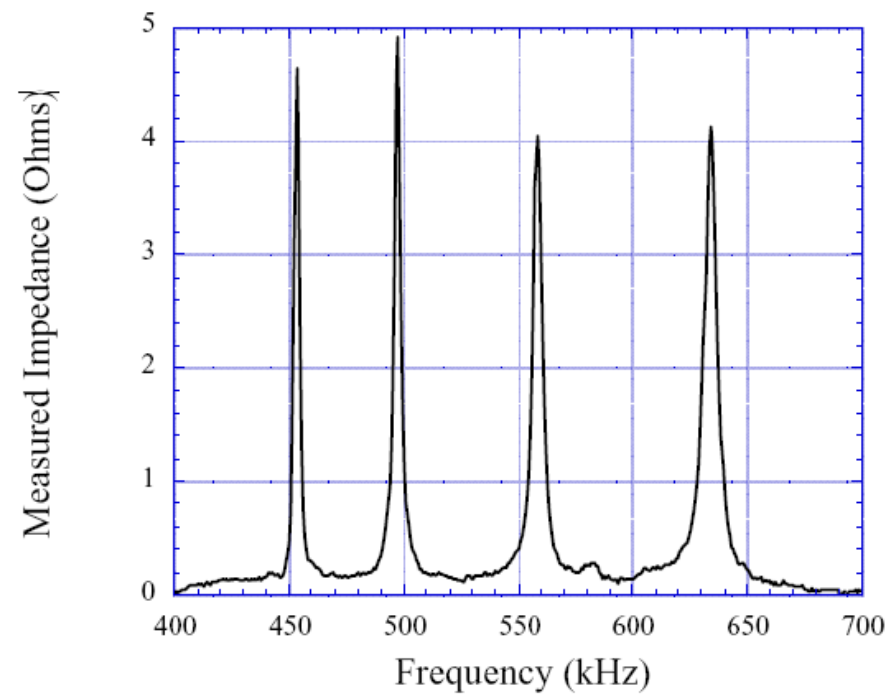
# Магнито-еластични сензори



Тънка гума от еластомагнитен материал формира резонатор с форма на малък камертон. Възбужда се с кратък магнитен импулс и се обработва честотата, амплитудата и степента на демпфериране. Масив от сензори - независими механични вибрации



Сензори за: влажност, вискозитет, твърдост, дебелина на покритие



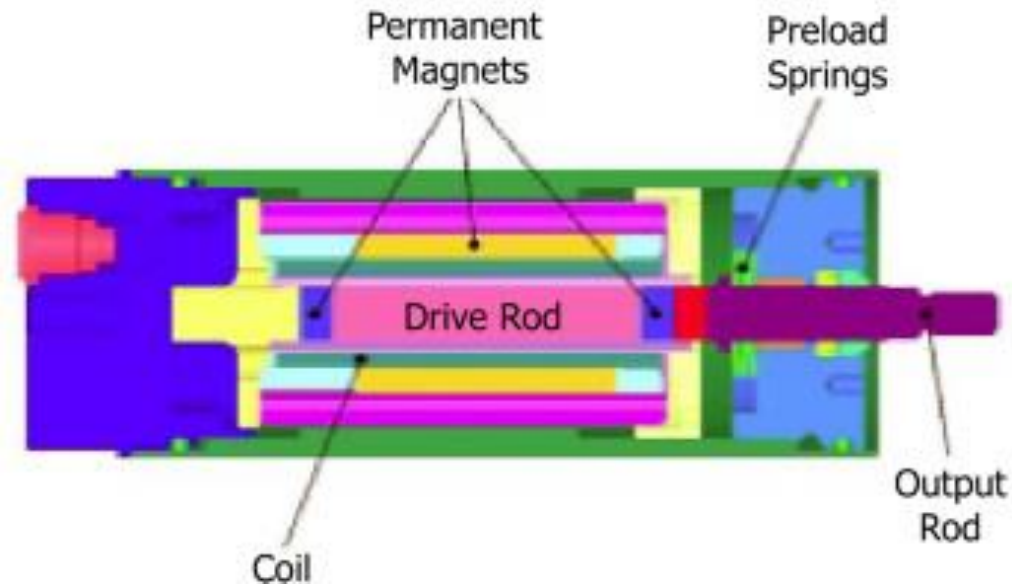


Material	Max. strain (ppm)*
Ni	-50
Fe	-14
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	60
Terfenol-D	2000
Tb <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub>	5500
Tb <sub>0.5</sub> Dy <sub>x</sub> Zn	5000

Някои материали като никел и желязо имат отрицателна магнитострикция, а други като Terfenol-D са с положителна магнитострикция.

Terfenol-D (Tb<sub>x</sub> Dy<sub>1-x</sub> Fe<sub>y</sub>), сплав от Dysprosium (Диспросий редкоземен метал 66 Лантаноид) и Terbium (Тербий – 65 от лантанидите) с Желязо

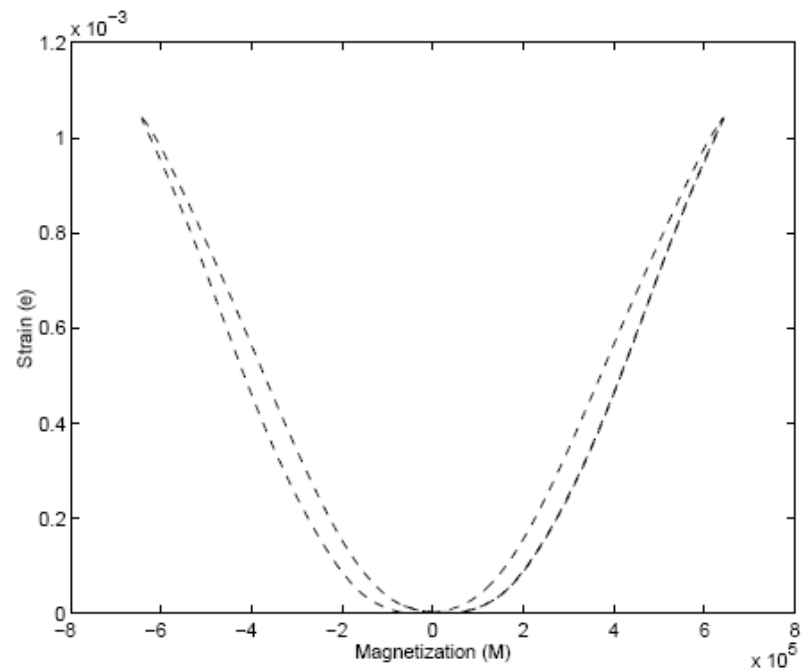
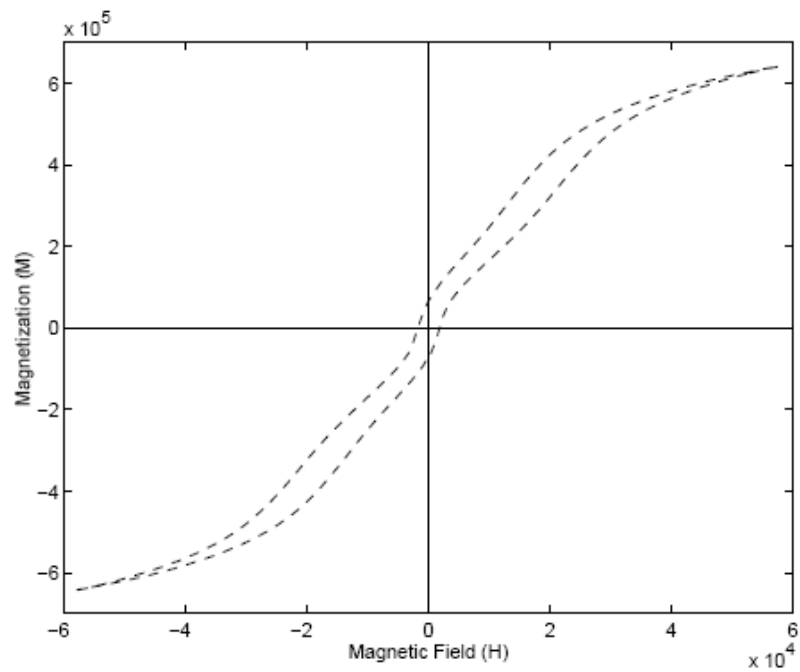
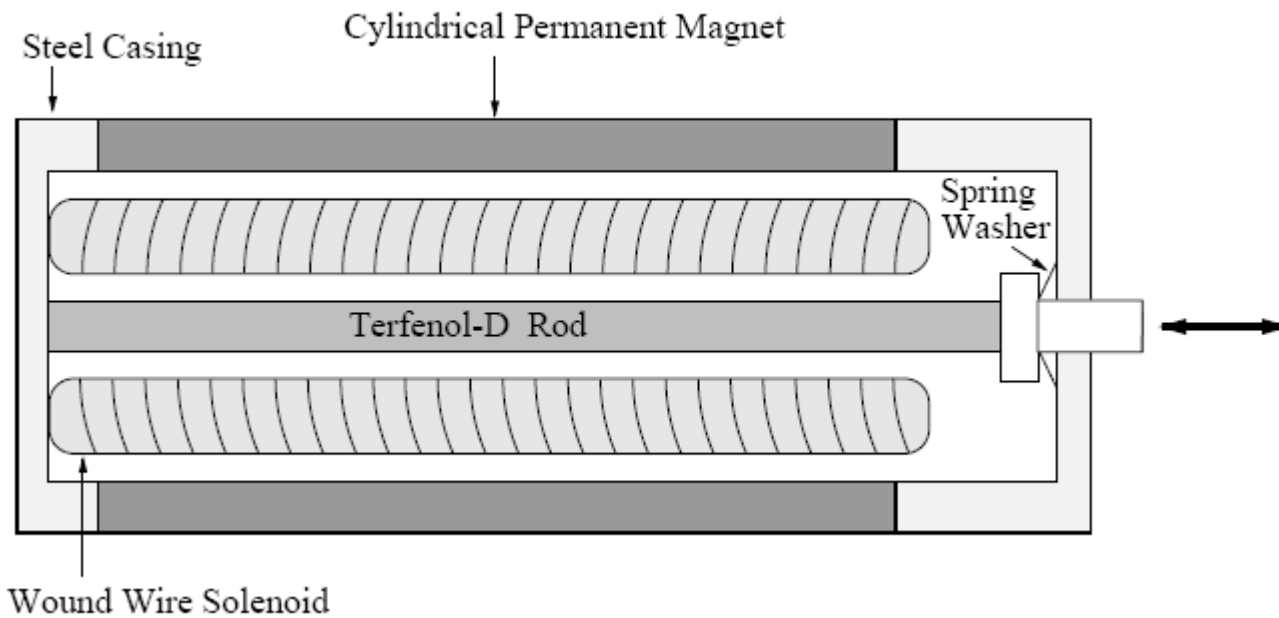
\*ppm – parts per million ( $\times 10^{-6}$ ) Tb -



По-голям ход и по-нисък хистерезис от пиезо-електричните задвижвания. Висока цена и голям обем поради необходимостта от соленоид, или друго устройство за създаване на магнитно поле.



Ultrasonic magnetostrictive actuator. Courtesy of ETREMA Products, Inc.



Магнитостриктивна сила:

$$F = \frac{g_{\Delta} E N}{R_m} i$$

Магнитостриктивно електрическо напрежение:

$$V = \frac{g_{\Delta} E N}{R_m} \dot{x}$$

$g_{\Delta}$  – надлъжен магнетостриктивен модул

$E$  – модул на Юнг

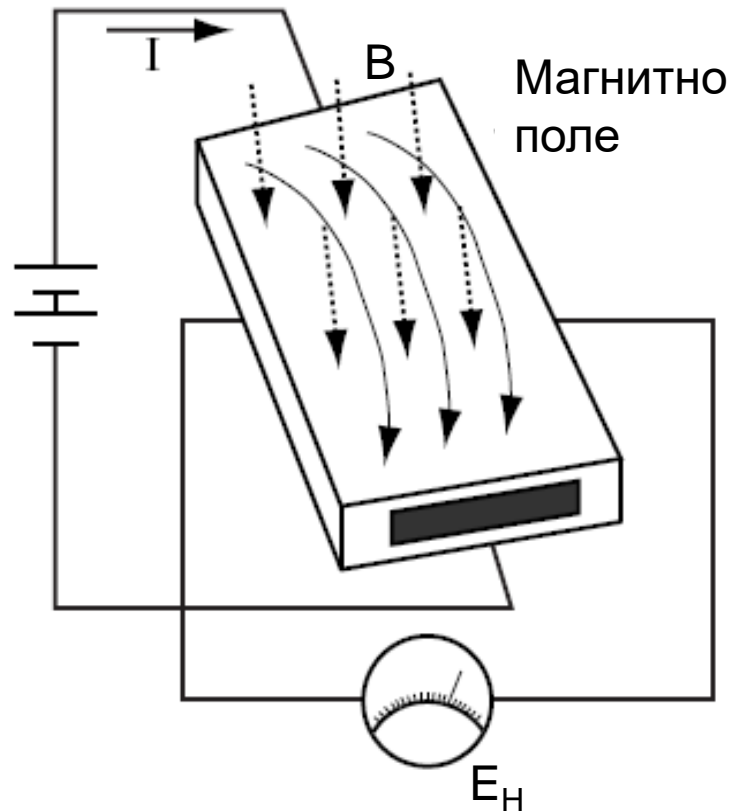
$N$  - брой на намотките

$R_m$  – сумарно магнитно съпротивление

$i$  – ел. ток;

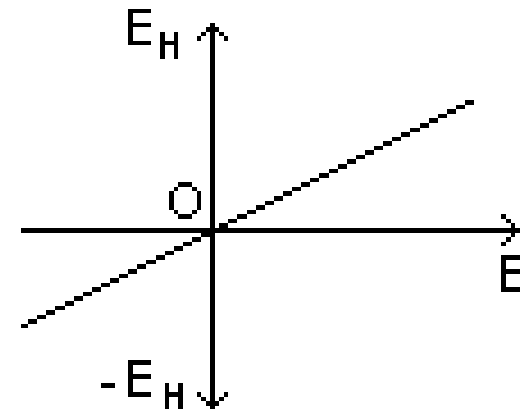
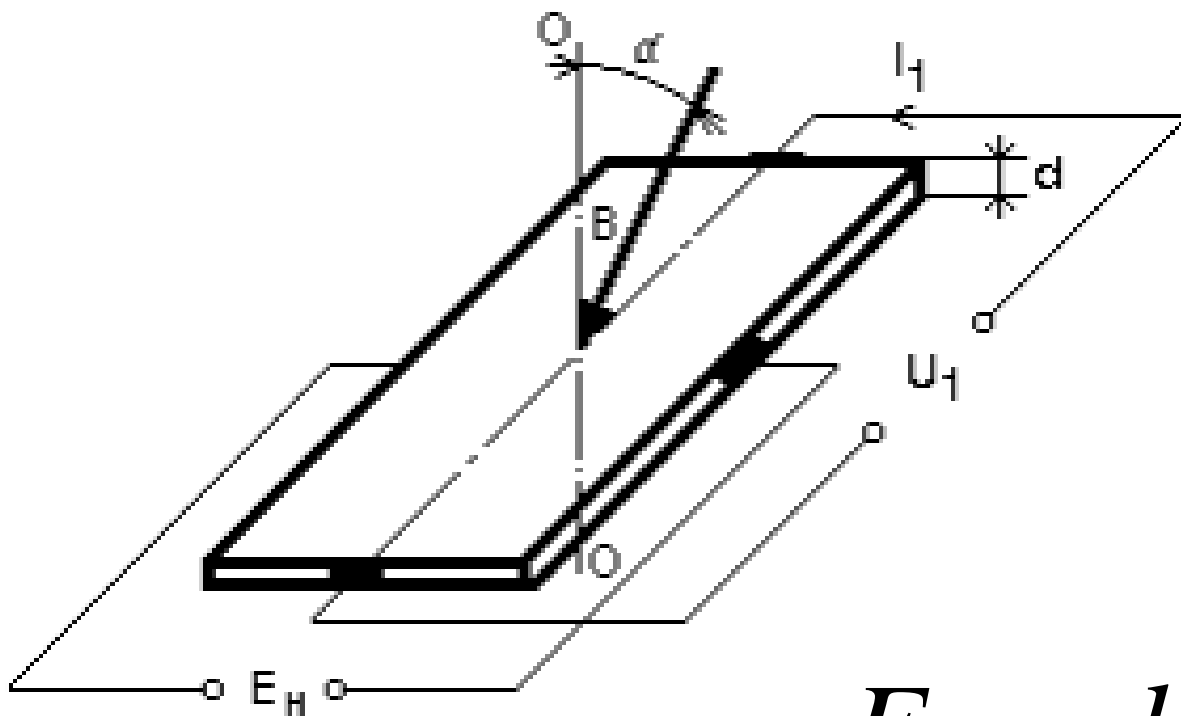
$\dot{x}$  - скорост на деформация

## Ефект на Хол в МЕМС



Ако в надлъжно направление на полупроводникова пластина, намираща се в магнитно поле с индукция  $B$  се пропусне електрически ток  $I$ , то напречно на пластината се получава електродвижещо напрежение  $E_H$  (напрежение на Хол). При отсъствие на магнитно поле  $E_H = 0$ . Този ефект е известен като ефект на Хол.

# Ефект на Хол в МЕМС



$$E_H = k_H \frac{I_1}{d} B \cos \alpha$$

$k_H$  - коефициент на Хол зависещ от свойствата на материала

$d$  – дебелина на пластината

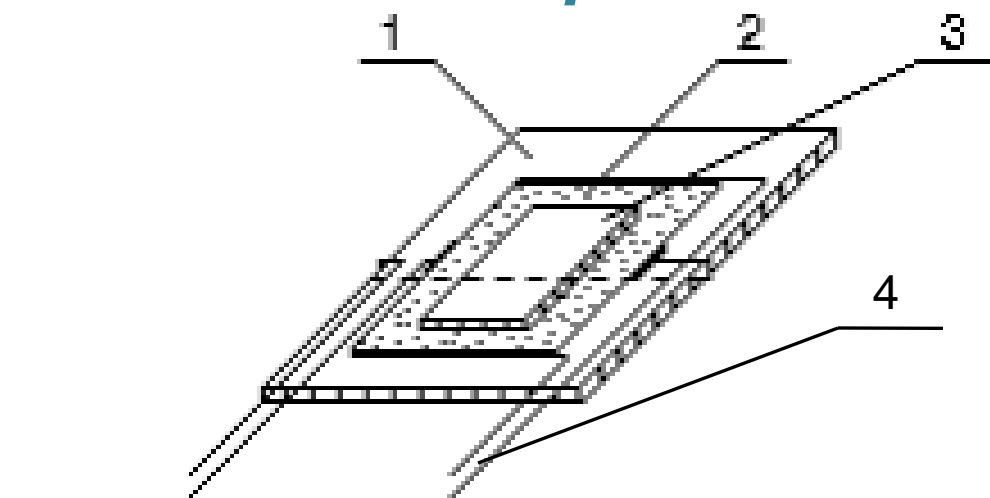
$\alpha$  – ъгъл между нормалата и направлението на магнитното поле

# *Ефект на Хол в МЕМС*

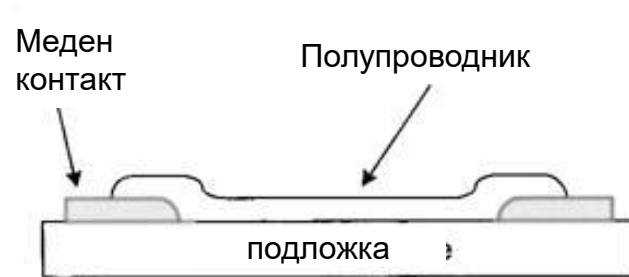
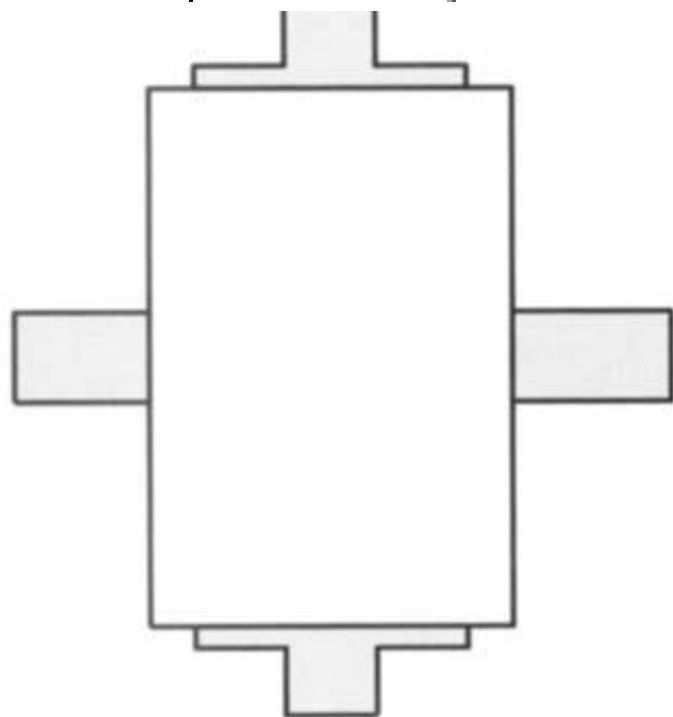
## Характеристики на ефекта на Хол

- Съдържа само електронни компоненти
- Дълъг живот
- Висока честота на работа- над 100 kHz
- Работи със стационарен вход (нулева скорост)
- Няма движещи се части
- Входът и изходът са съвместими с цифрови логически системи
- Широк температурен обхват (-40 до 150°C)
- Висока повторяемост

# Ефект на Хол в MEMS



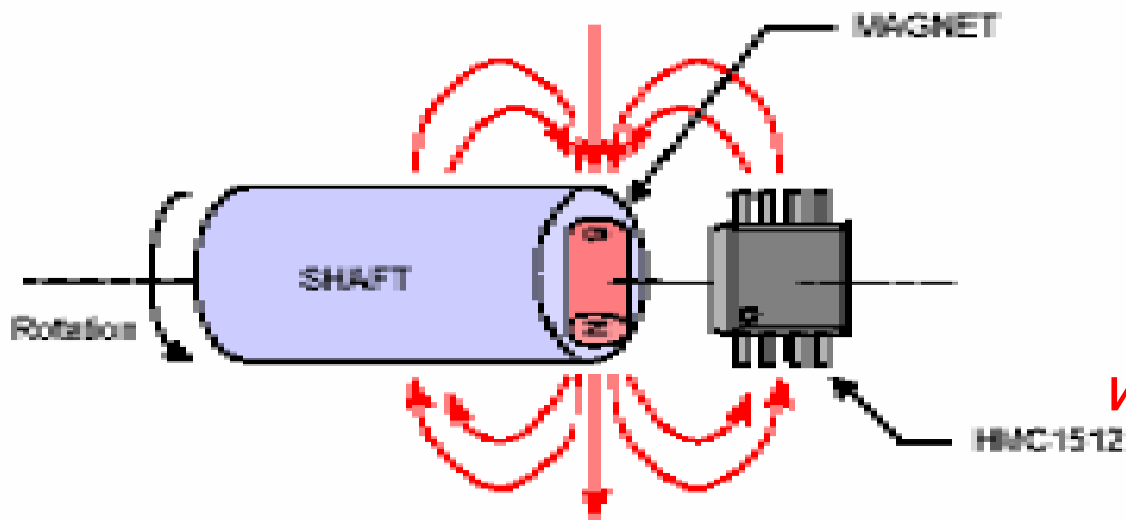
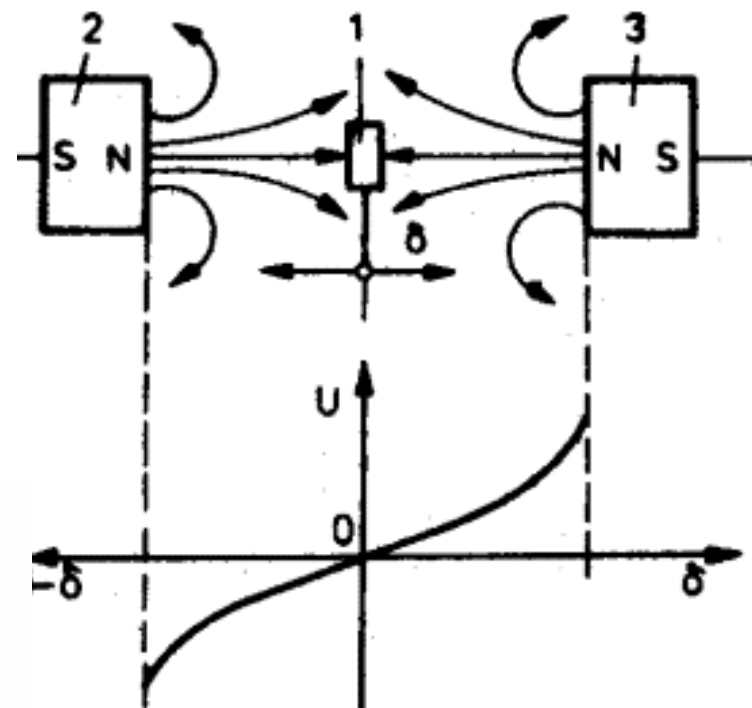
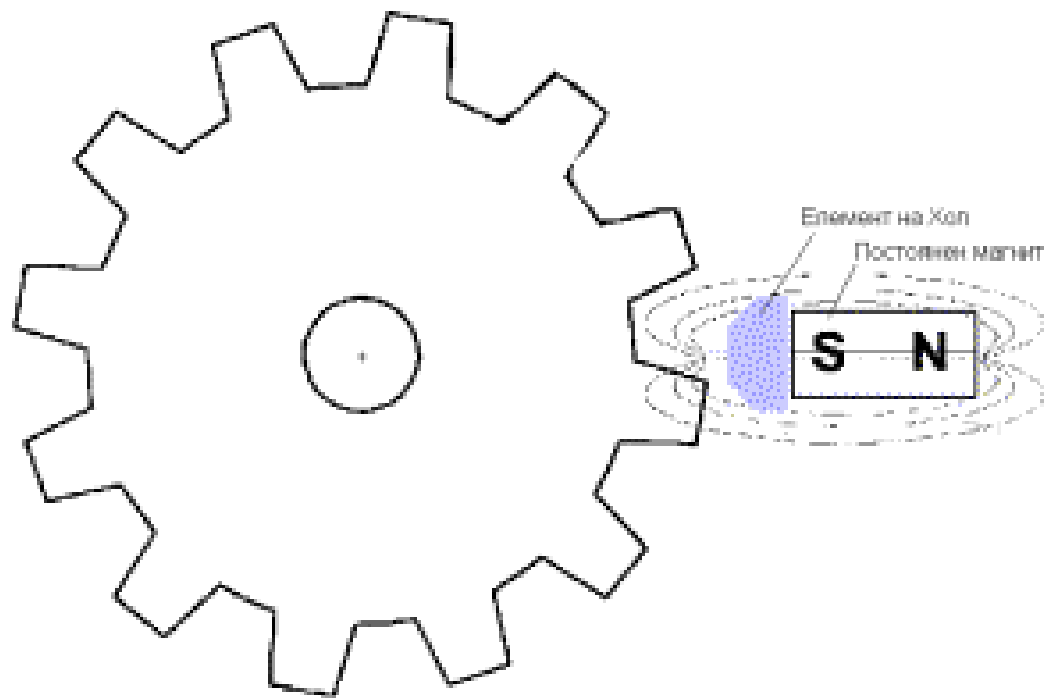
- 1 – подложка
- 2 – активна пластина
- 3 – предпазен слой
- 4 – електроди



Идеализирана схема на преобразовател на Хол с тънък филм

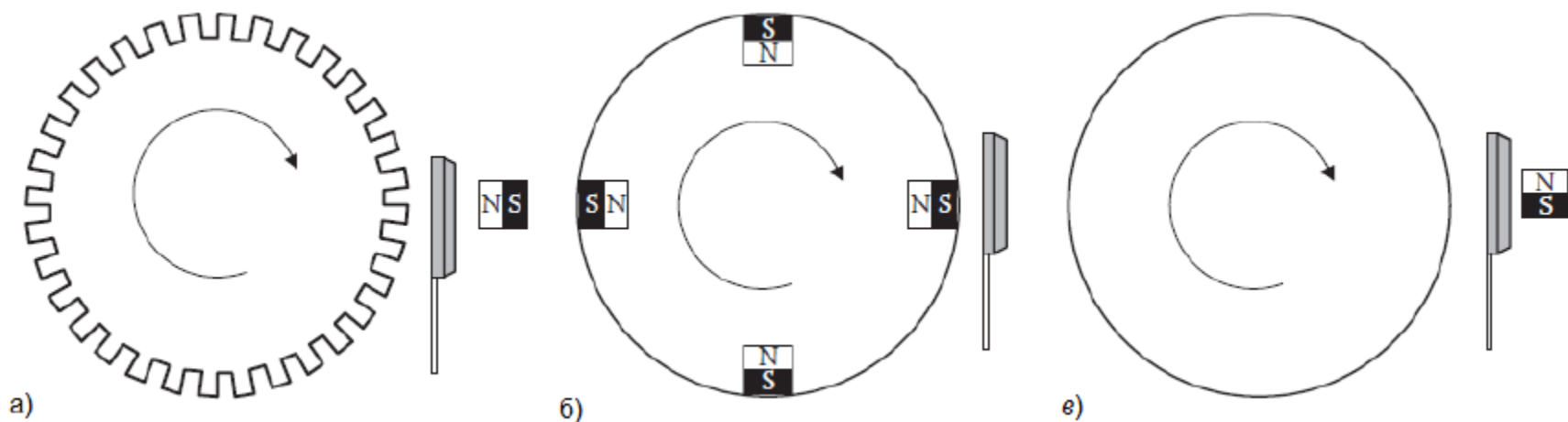


# Ефект на Хол в MEMS

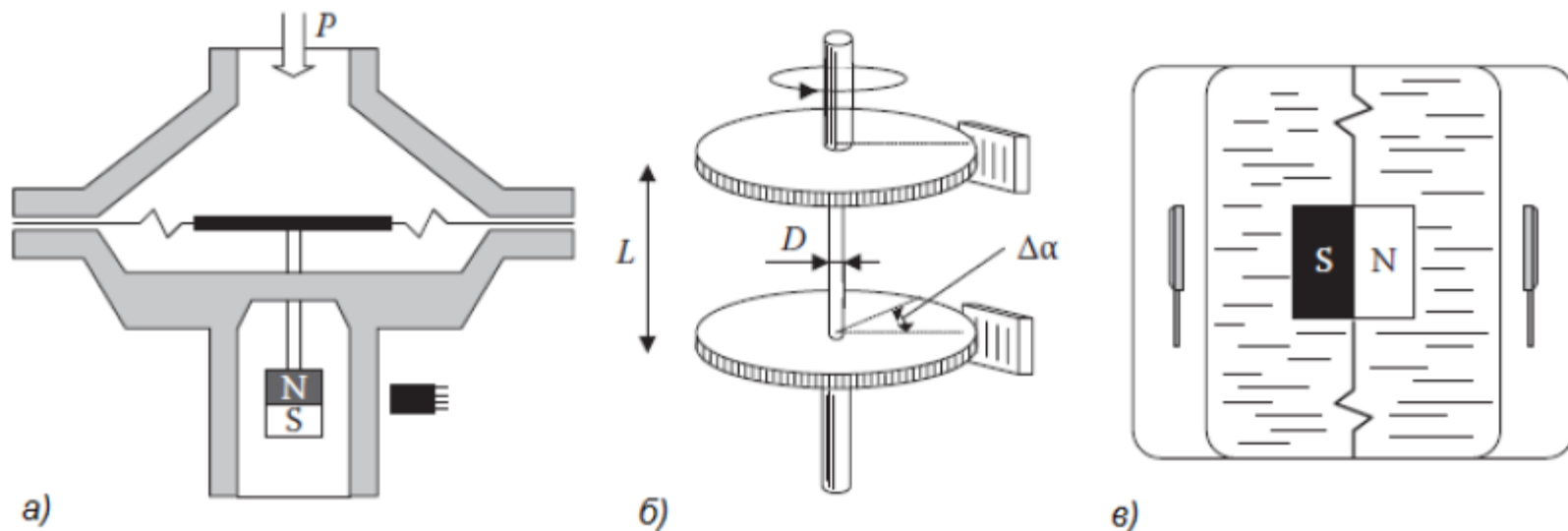


Принципни схеми за измерване на обороти и ПОЗИЦИЯ

# Ефект на Хол в МЕМС



Приложения на Хол сензори за измерване на ъгловата скорост: а) чрез ферромагнитно зъбно колело; б) въртящи се магнити; г) измерване на вихрови токове



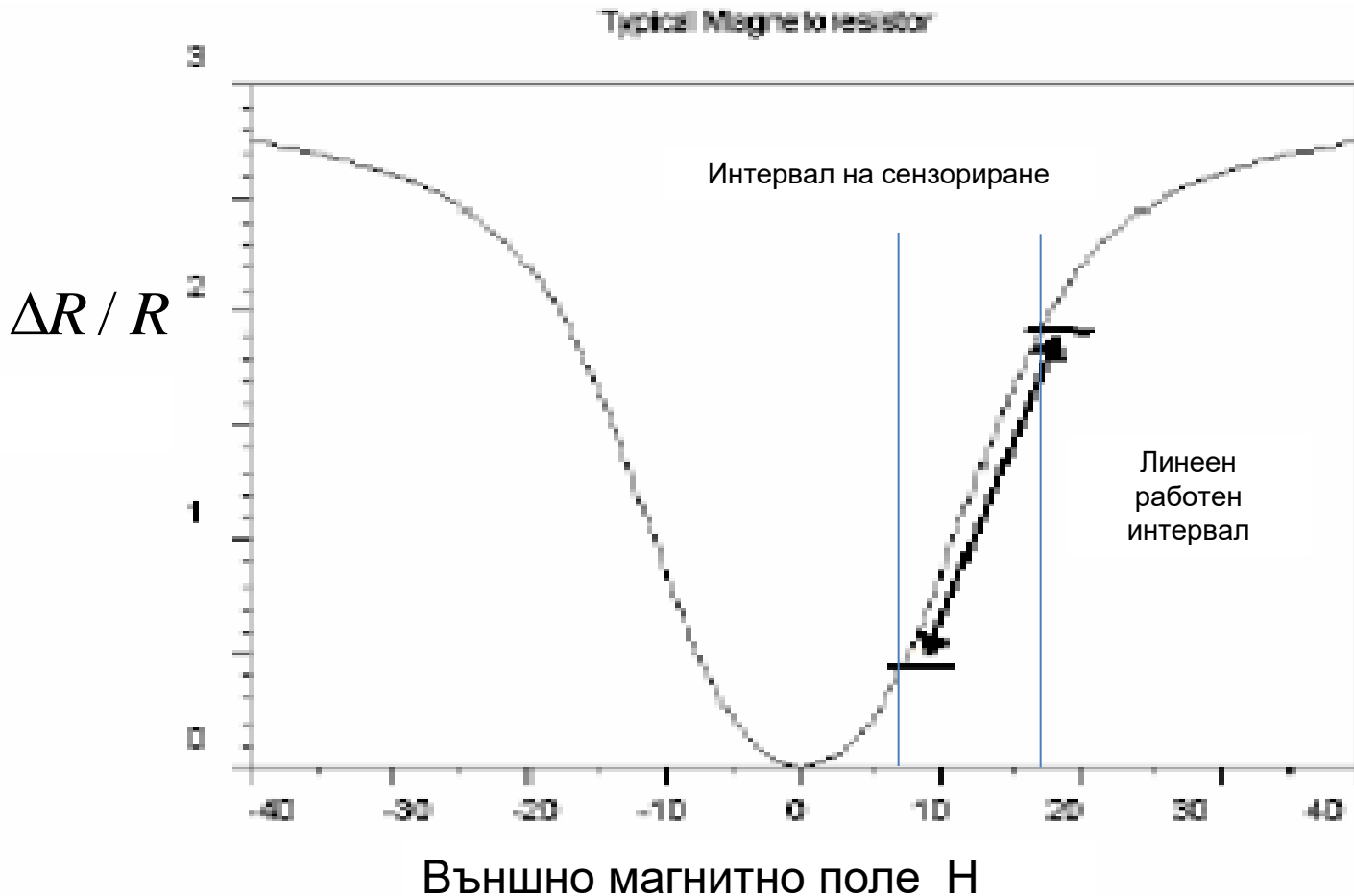
Измерване на: а) налягане;

б) момент;

в) ускорение

# Магниторезистивни сензори

Магниторезистивният ефект е открит през 1857 г. от Томсън (Лорд Келвин) и е бил наречен анизотропен магниторезистивен ефект, защото изменението на съпротивлението предизвикано от магнитно поле във феромагнитните материали е различно в надлъжна и напречна посока.



# Анизотропно магнито- съпротивление (АМС)

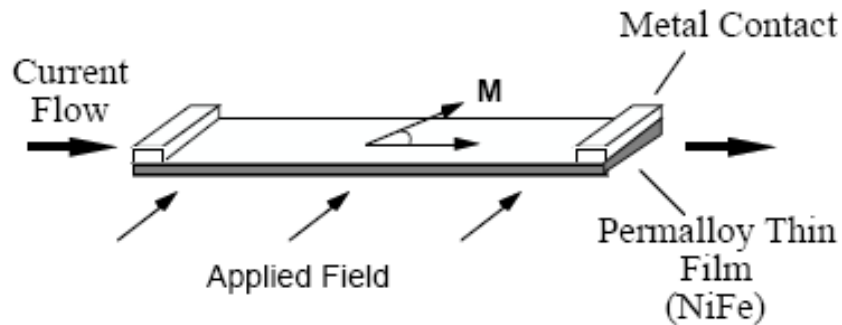


Figure 1. Principle of operation for MR sensors.

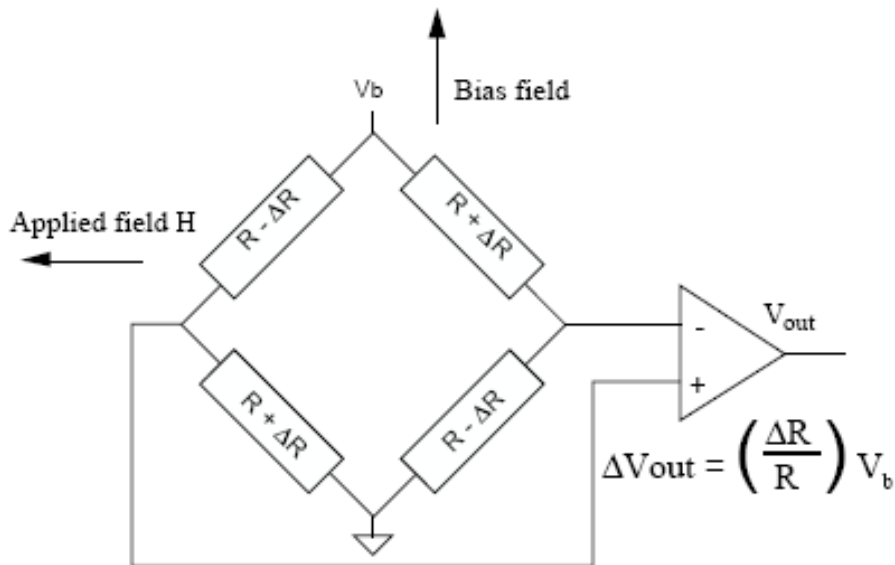


Figure 2. Magnetoresistive transducers.

Анизотропното магнитосъпротивление (АМС) възниква във фероматериалите. Това е промяна на съпротивлението, когато е приложено магнитно поле, перпендикулярно на посоката на тока в тънка лента (фиг. 1). Преобразователят е във формата на уитстонов мост (фиг. 2) Съпротивлението  $R$  на всички магнорезистори е еднакво. Захранващото напрежение  $V_b$ , създава ток в резисторите. Приложеното напречно магнитно поле  $H$ , предизвиква намагнетизиране на двойките противоположно разположени по посока на тока резистори и предизвиква нарастване на съпротивлението  $R$ . В другите два противоположни резистора се предизвиква намаляване на съпротивлението  $R$ . В линейния обхват изхода става пропорционален на приложеното магнитно поле  $\Delta V = S H V_b$ . Интервалът на линейност е обратно пропорционален на чувствителността. За MR сензор на Honeywell чувствителността е обикновено  $3 \text{ mV}/(\text{V/Oe})$  и интервалът на линейност е около  $2 \text{ Oe}$ .

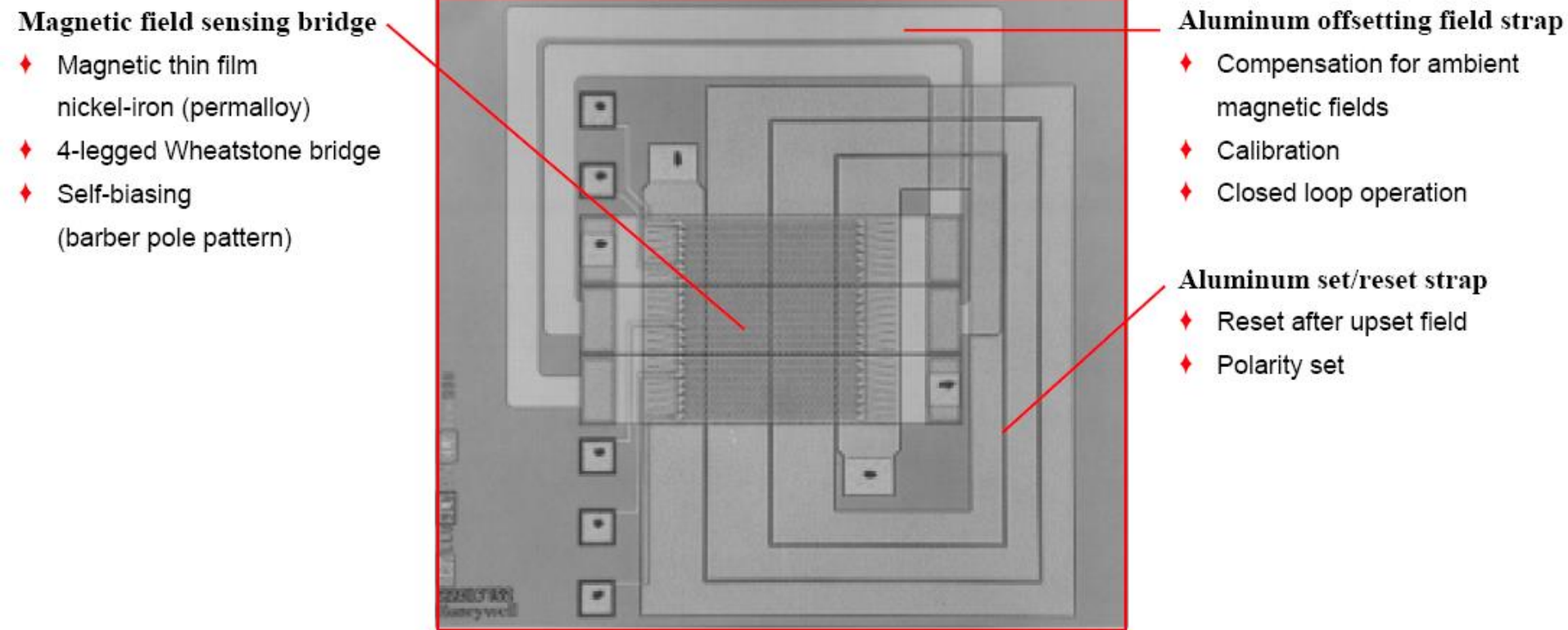
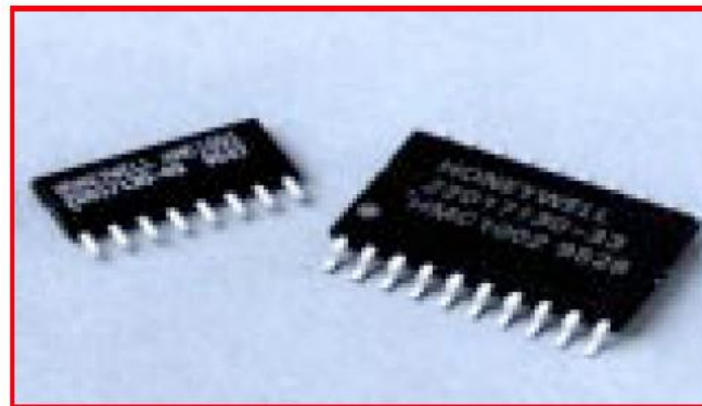


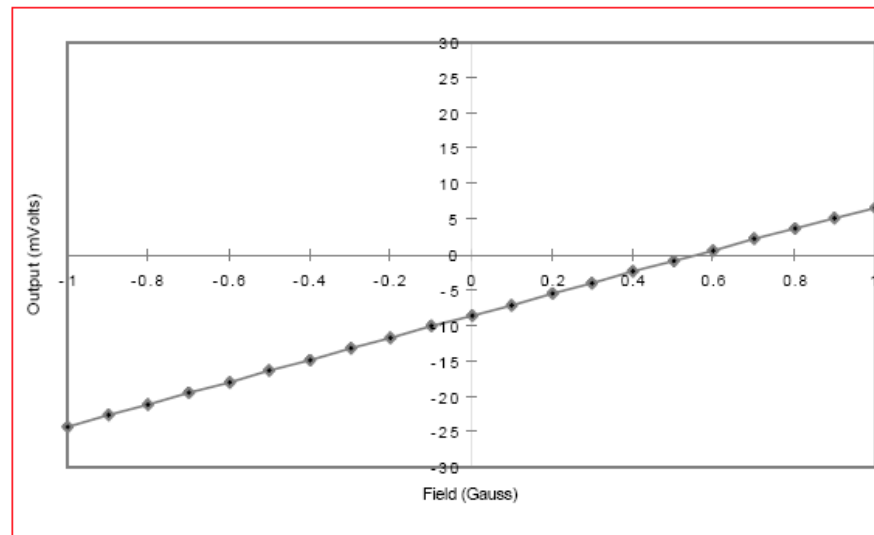
Figure 3. Magnetoresistive sensing element.

Магниторезистивните сензорни елементи на Honeywell са изработени от тънък филм NiF, нанесен на силициева подложка, формиращи уитстонов резисторен мост. Включени са on-chip токови ленти, които може да се използват за електрическо включване или изключване на поляритета на изхода и чрез прилагане на изместено поле да се компенсират обкръжаващото магнитно поле.

# HMC1001/1002



Sensitivity .....	3mV/V/Gauss
Field Resolution .....	40 $\mu$ Gauss
Field Range .....	$\pm 2$ Gauss
Linearity .....	$\pm 0.5-1\%$ full scale
Output Voltage .....	15 mV/Gauss
Bandwidth .....	over 1MHz



Honeywell предлага следните видове сензори на Хол:

**HMC1001/2**— Дискретни сензори за приложения с ниски цени

**HMC2003**— Хибридни за лесна употреба за устройства с аналогов изход

**HMR2300**— Интелигентни цифрови магнитометри за отговорни операции и лесни за употреба.

## Предимства:

**Висока чувствителност** — осигуряват линеен високочувствителен изход за полета с ниски интервали близки до земното магнитно поле.

**Нисък шум** - осигуряват резолюция водеща до високо бързодействие и стабилни показания без изкривявания. Не са необходими филтри, което намалява цената.

**Автоматично калибриране** — употребата на тънките ленти може да елиминира необходимостта от настройки, което намалява цената.

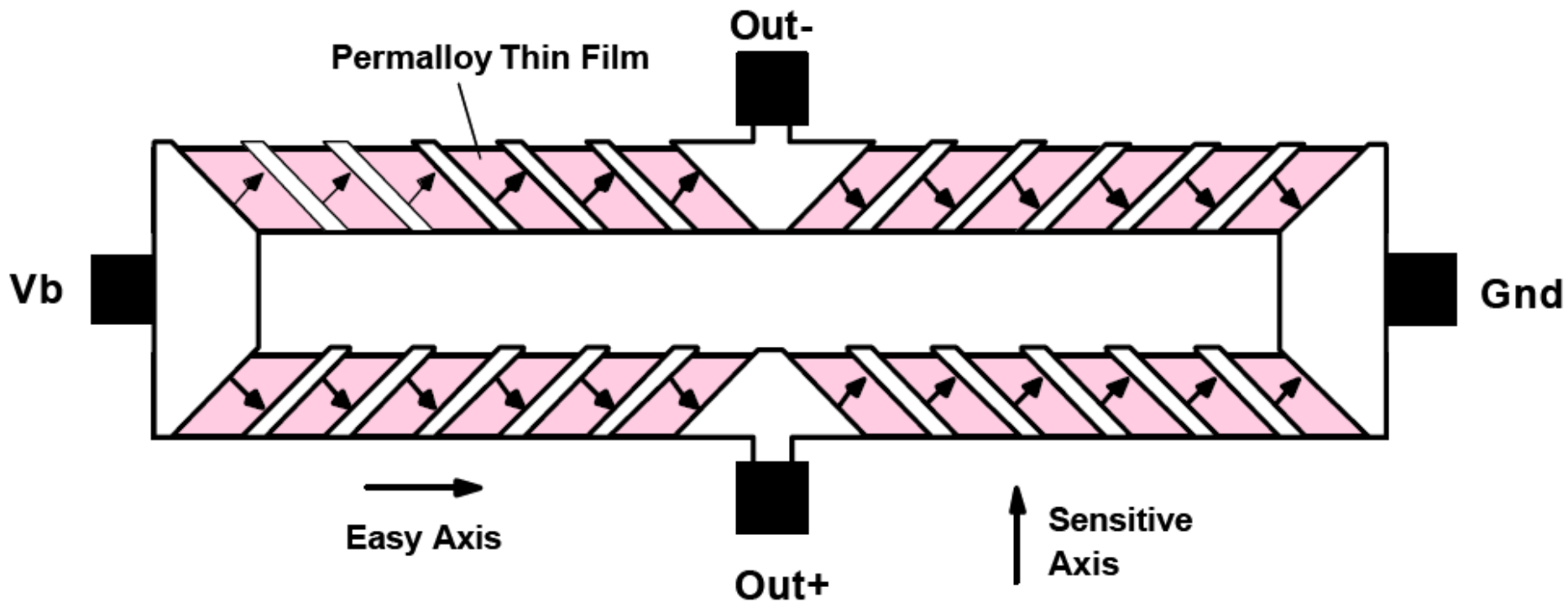
**On-Chip интегрирани ленти** – повишава резолюцията и елиминира необходимостта от външни намотки.

**Лесни за монтаж** — монтират се на печатни платки.

**Лесни за употреба** — HMR2300 се свързва директно към PC (сериен порт) и имат лесен за ползване софтуер.

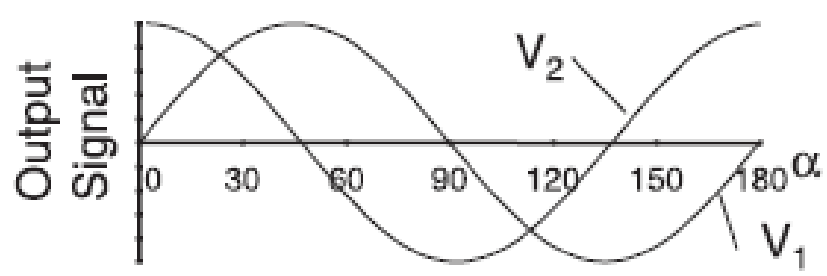
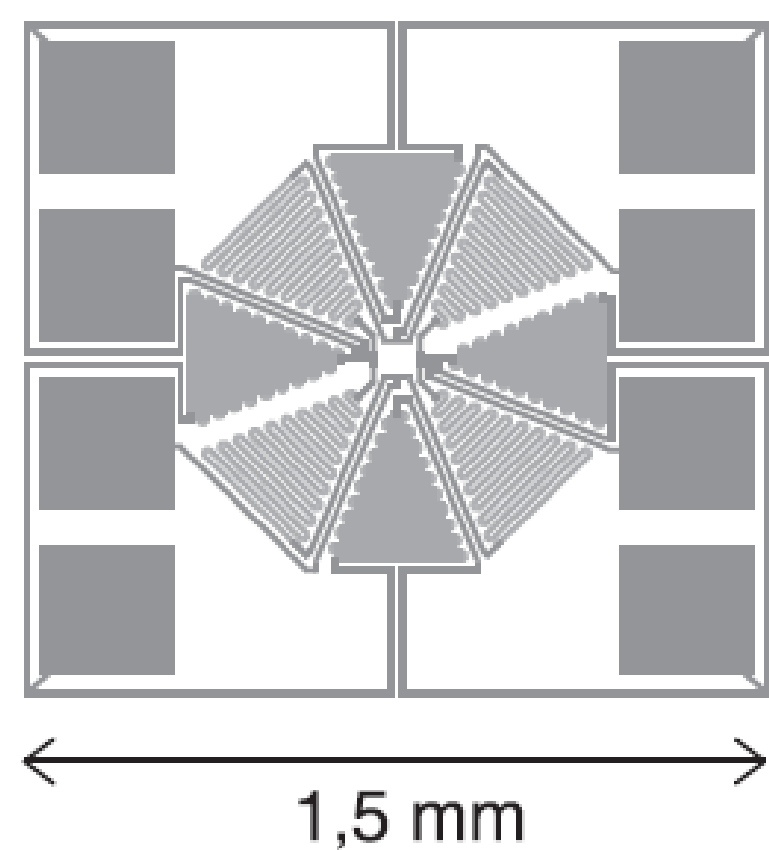
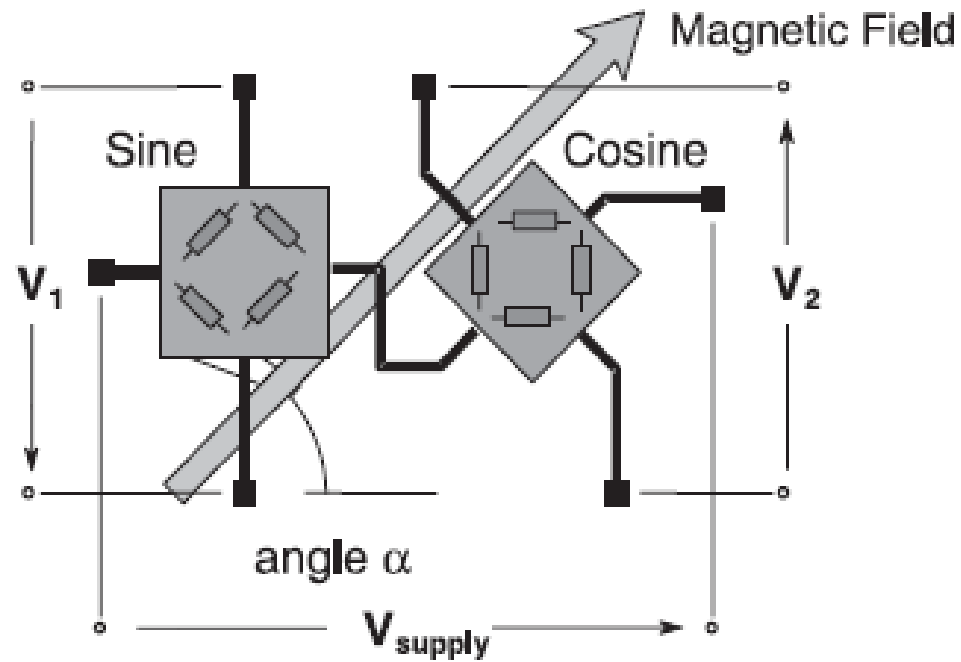
**Температурно компенсирани** - специална електроника редуцира ефекта, присъщ на магнетростриктивните устройства.

**Висока надеждност**— изцяло модерна техника.



## Елементи с магниторезистивни уитстонови мостове

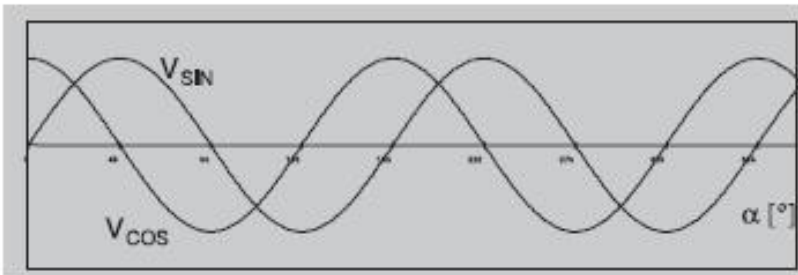
Тези елементи са подредени така, че да имат обща чувствителна ос (показана със стрелките), която дава положително напрежение при магнитно поле приложени по оказаната ос. Понеже изходът и неговата стойност е зависим само от направление по една единствена ос (*принципът на анизотропията*), допълнителни сензори образуват мостове в ортогонални посоки позволявайки точно измерване в произволна посока. Този принцип се използва за компаси и магнитометри.



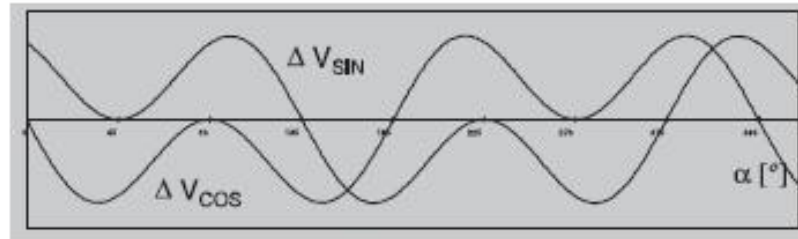
Принцип и общ вид на AMR ъглов сензор за 180° измервателен обхват.

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{V_1}{V_2} \right)$$

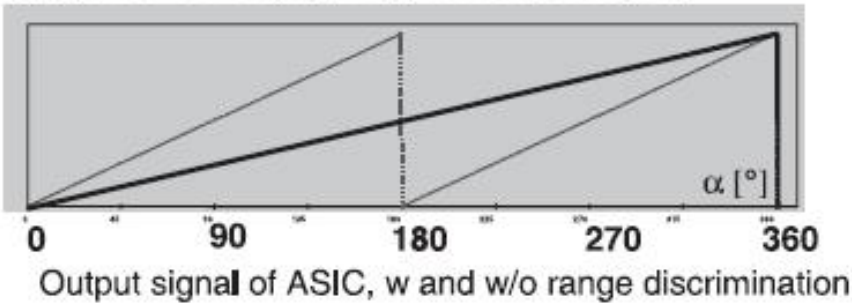




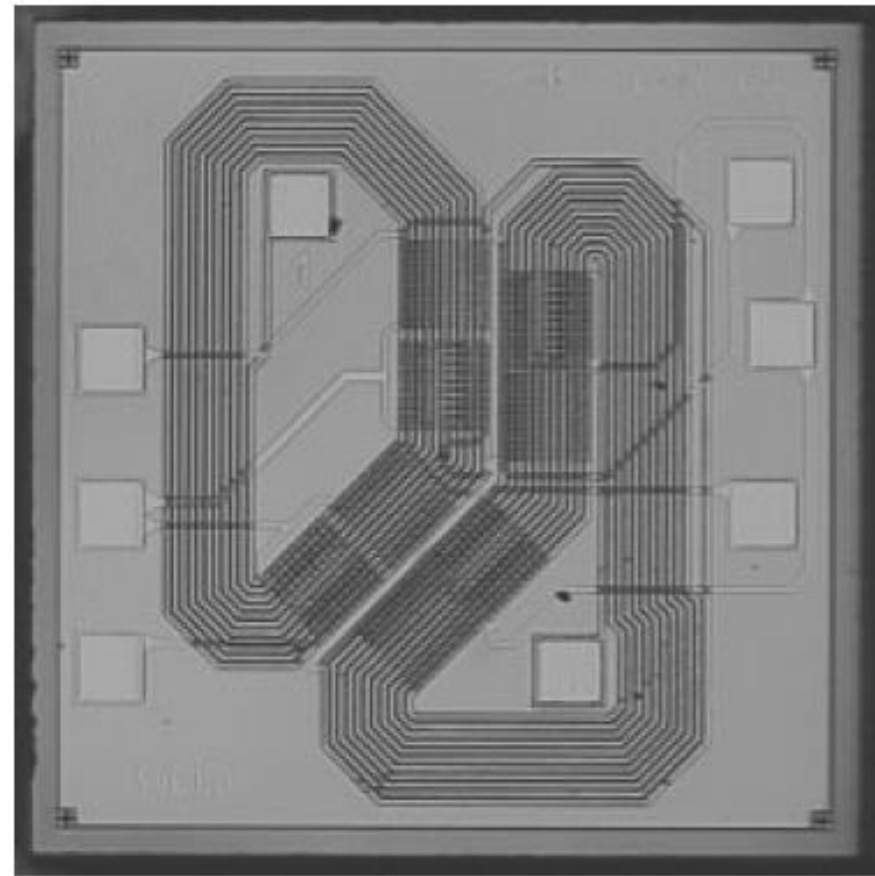
Output Signals of Wheatstone Bridges



Influence of Auxiliary Field on Output Signal



Output signal of ASIC, w and w/o range discrimination

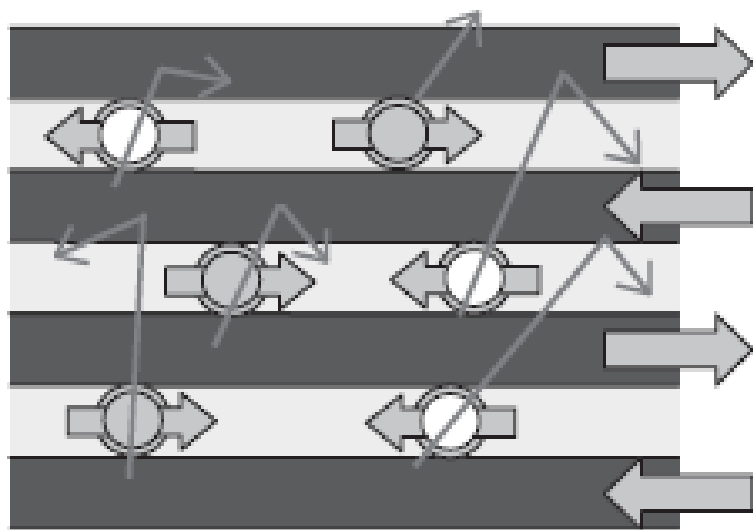


1.82 mm

## Принцип и общ вид на AMR360 сензор

**Гигантски магнито-резистивен ефект (GMR)** – възниква в многослойни редуващи се слоеве от феромагнитен и неферомагнитен материал. Съпротивлението на тези “сандвичи” може да се измени чрез промяна на намагнетизирането във феромагнитните слоеве анти-паралелно или паралелно, като така се влияе на ориентирането на токоносещите електрони.

### Anti-parallel Alignment



### Parallel Alignment

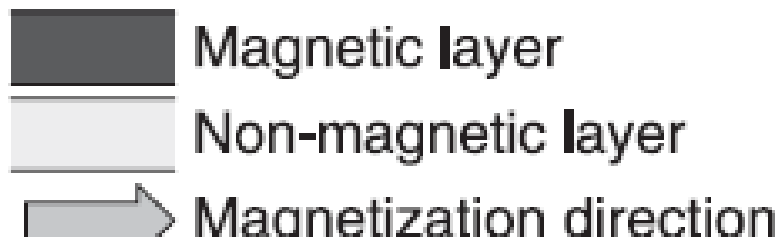
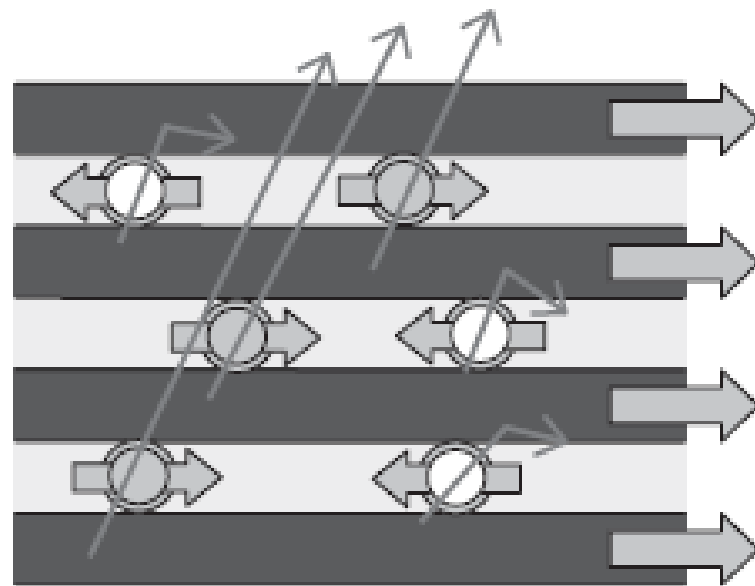
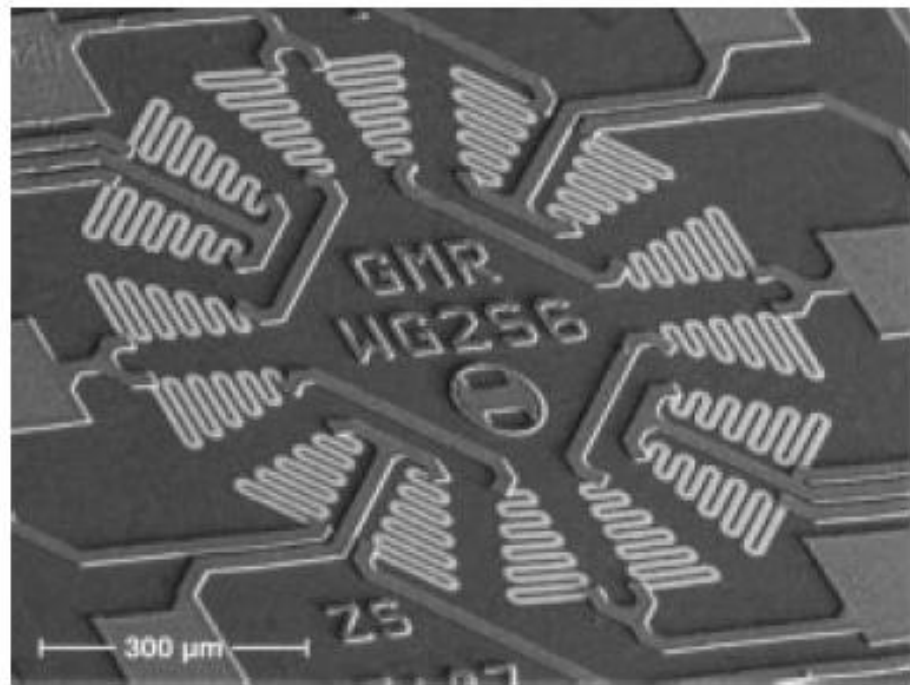
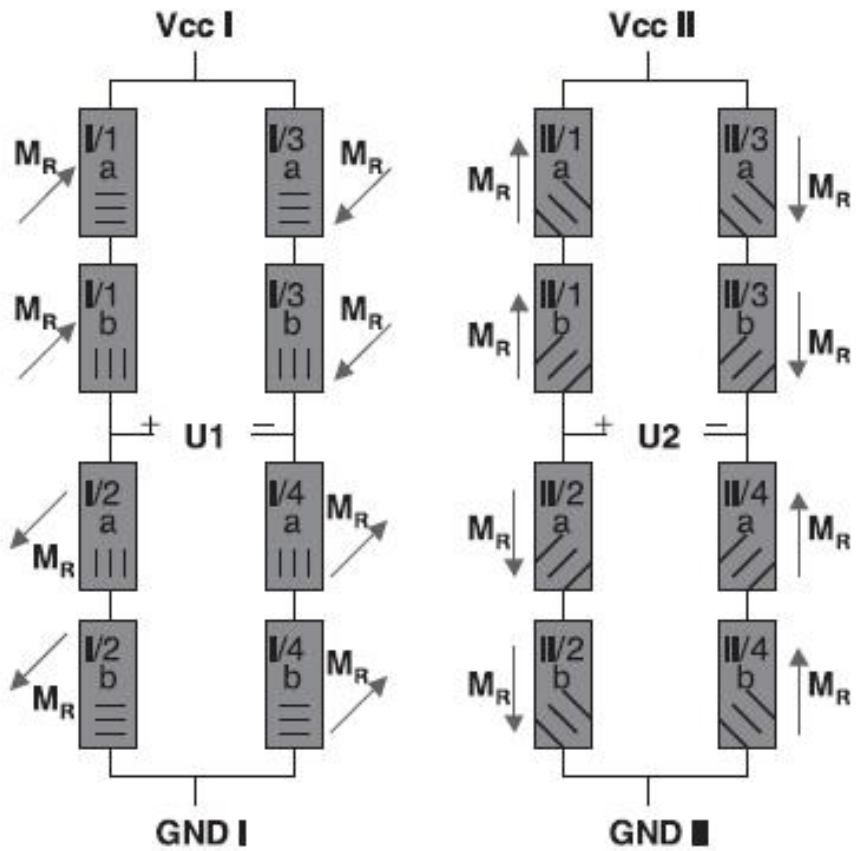
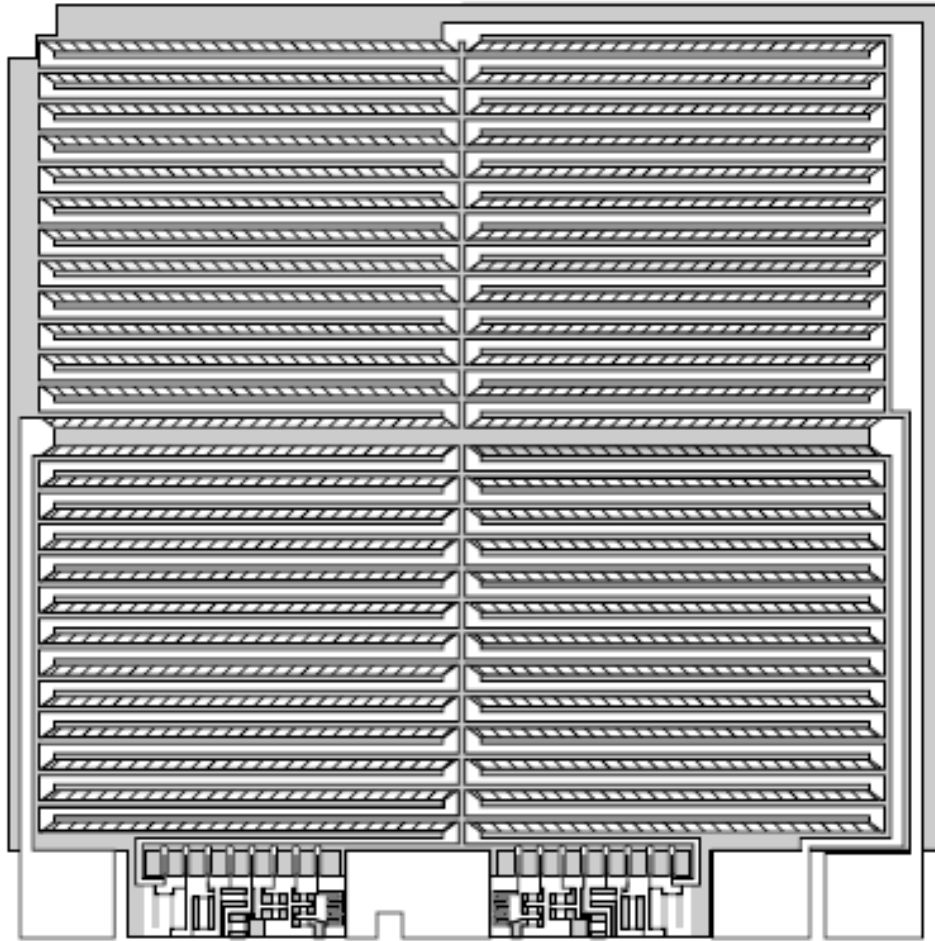


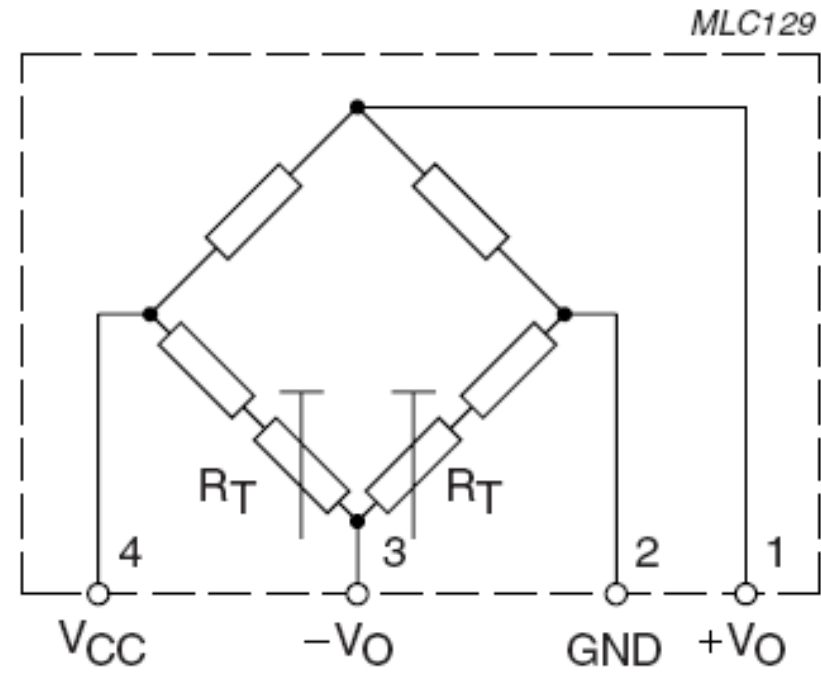
Fig. 5.7.5 Spin-dependent scattering

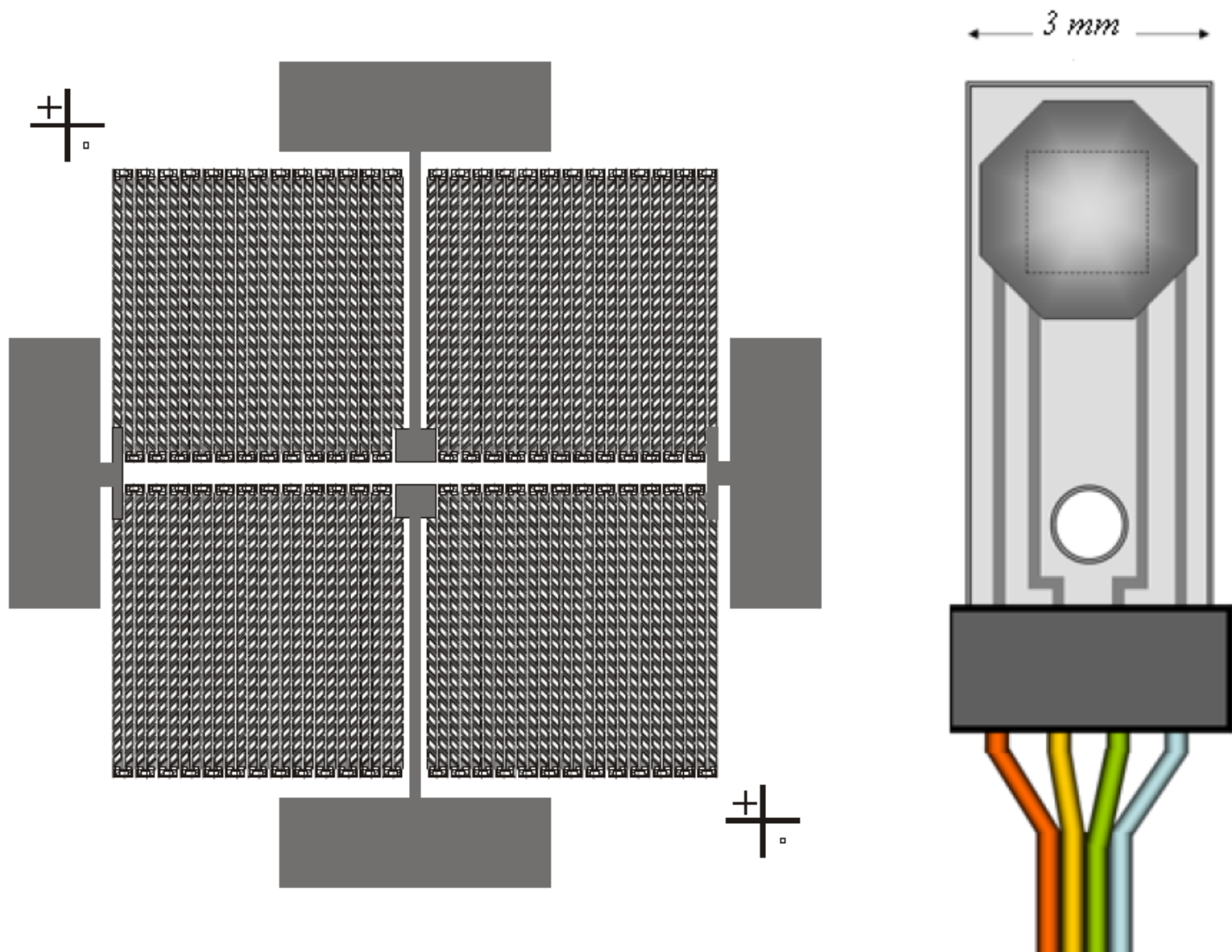


# GMR angle sensor

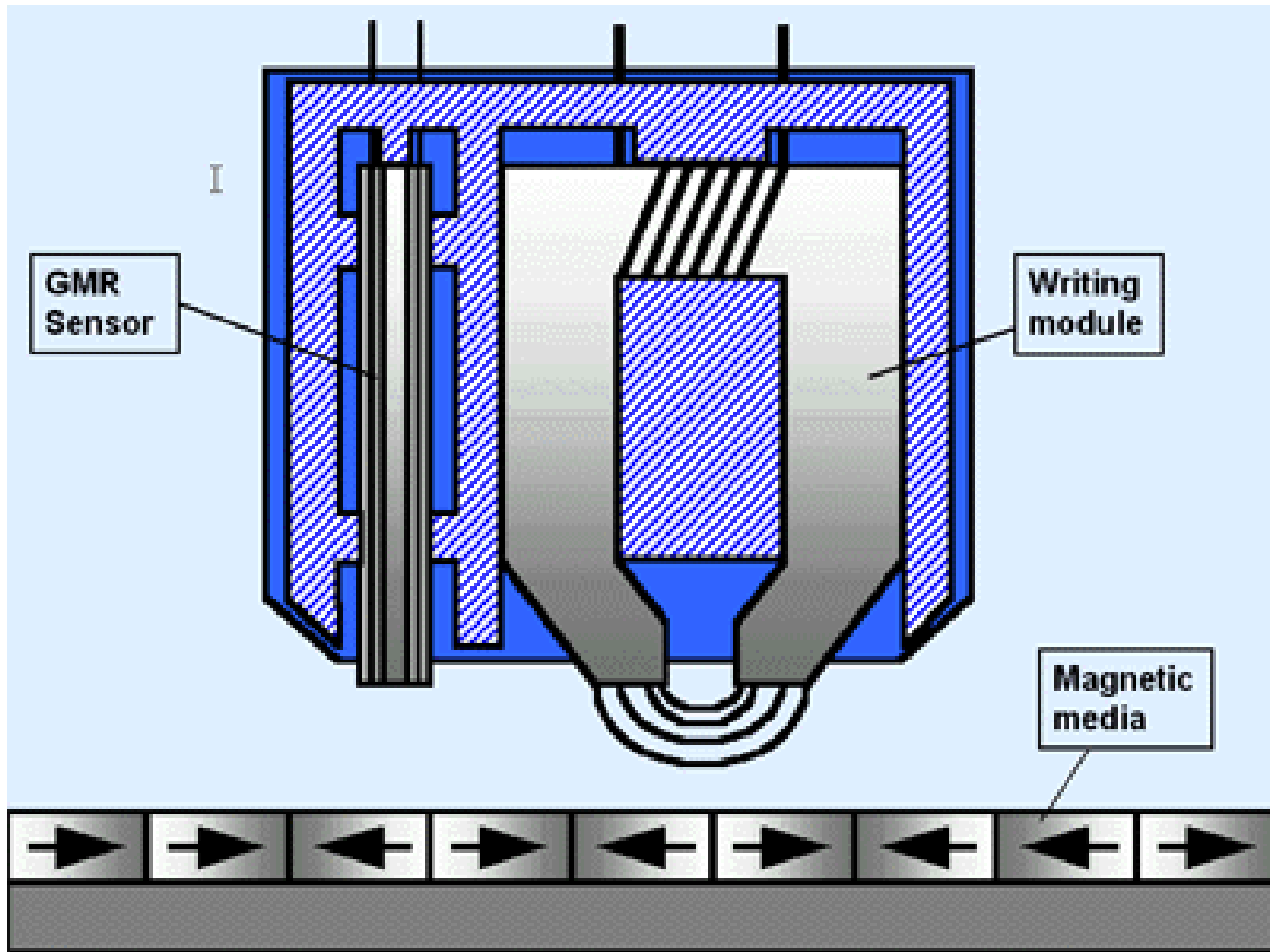


MBC890





AMR сензор, състоящ се от комплементарни магниторезистори свързани в мостова схема а) примерна структура; б) изработен AMR сензор с печатна платка и проводници (с любезното позволение на доц. Стефан Андреев, Лаб. "Физически проблеми на микроелектрониката", ИФТТ – БАН)

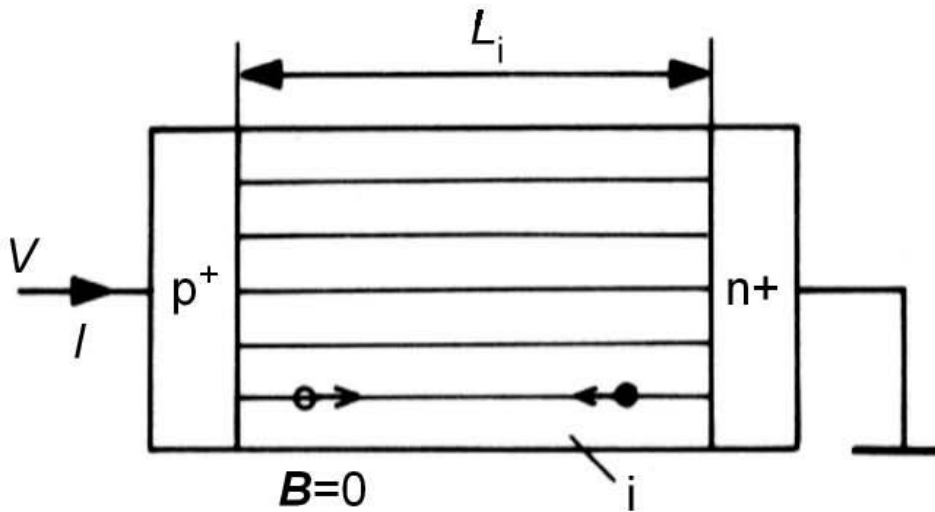


## Related XMR effects

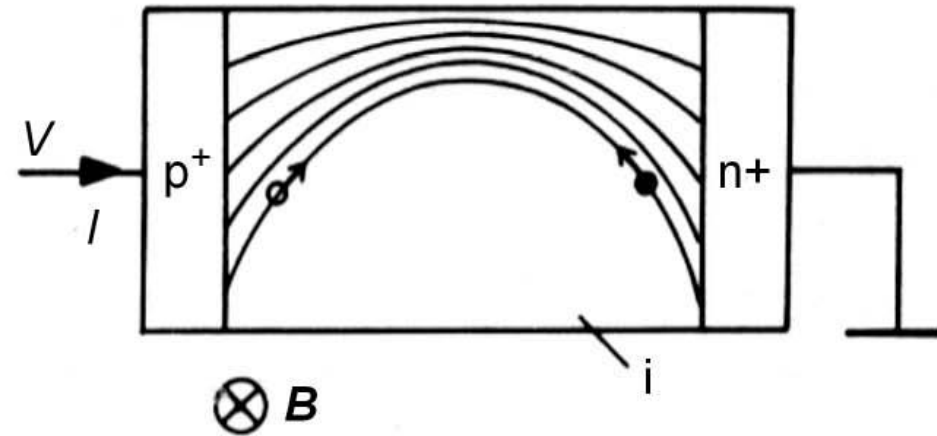
*Tunneling magnetoresistance* (TMR) material has a similar stack as do spin valves, but (instead of a conducting spacer) an isolating barrier, usually  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , is placed between the two ferromagnetic layers. The electrons tunnel perpendicularly through the TMR stack, which is why it is called tunneling magnetoresistance. The tunneling current is largest when the magnetization directions in both magnetic layers are parallel and smallest in the anti-parallel state. The magnitude of the effect ranges from 30% to more than 50%. Presently, such companies as IBM, Infineon, Motorola, and others are working intensively on TMR elements for the use in new nonvolatile memories, called *magnetic RAMs* (MRAM).

*Colossal magnetoresistance* (CMR) was discovered in 1993 and is, in contrast to GMR and TMR, an intrinsic effect [34]. The extreme change in resistance, on the order of 100%, can be explained by the suppression of a metal-to-insulator transition at the Curie temperature  $T_c$  due to an external magnetic field. Below  $T_c$  the spins of electrons in ferromagnetic materials are aligned parallel (corresponding to the Néel temperature of antiferromagnets). At temperatures above  $T_c$  CMR materials are insulators or semiconductors, and below  $T_c$ , ferromagnetic metals. why the CMR is not technically used so far. First, most CMR materials have a  $T_c$  close to room temperature, and second, colossal resistance changes are obtained only at very high magnetic fields, on the order of several Tesla. Therefore, CMR materials have a very restricted temperature range and very low sensitivity.

# Магнито-диоден ефект



(a)

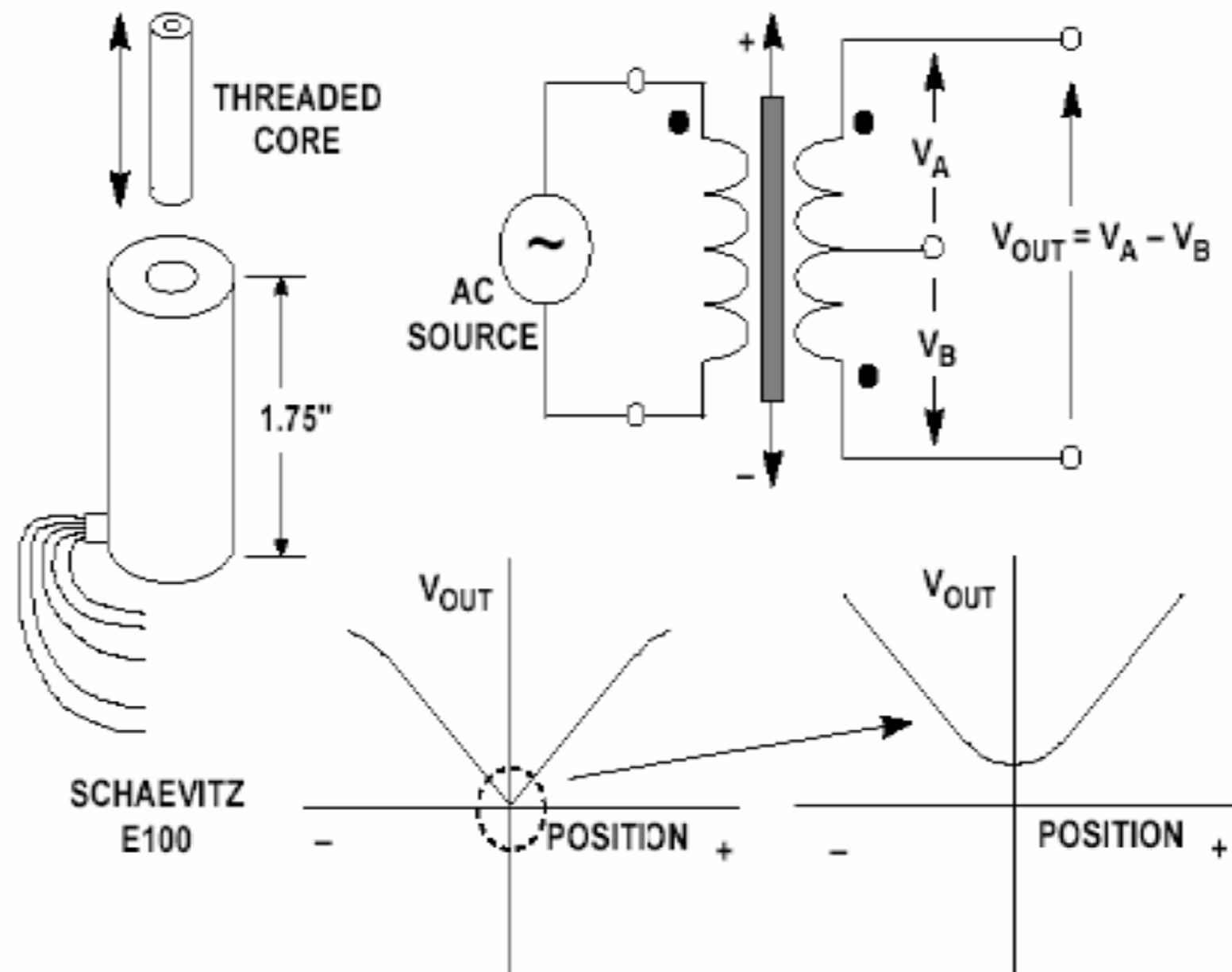


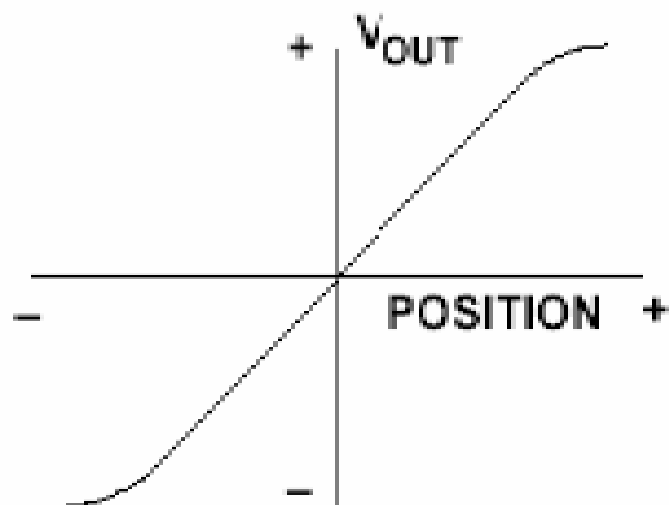
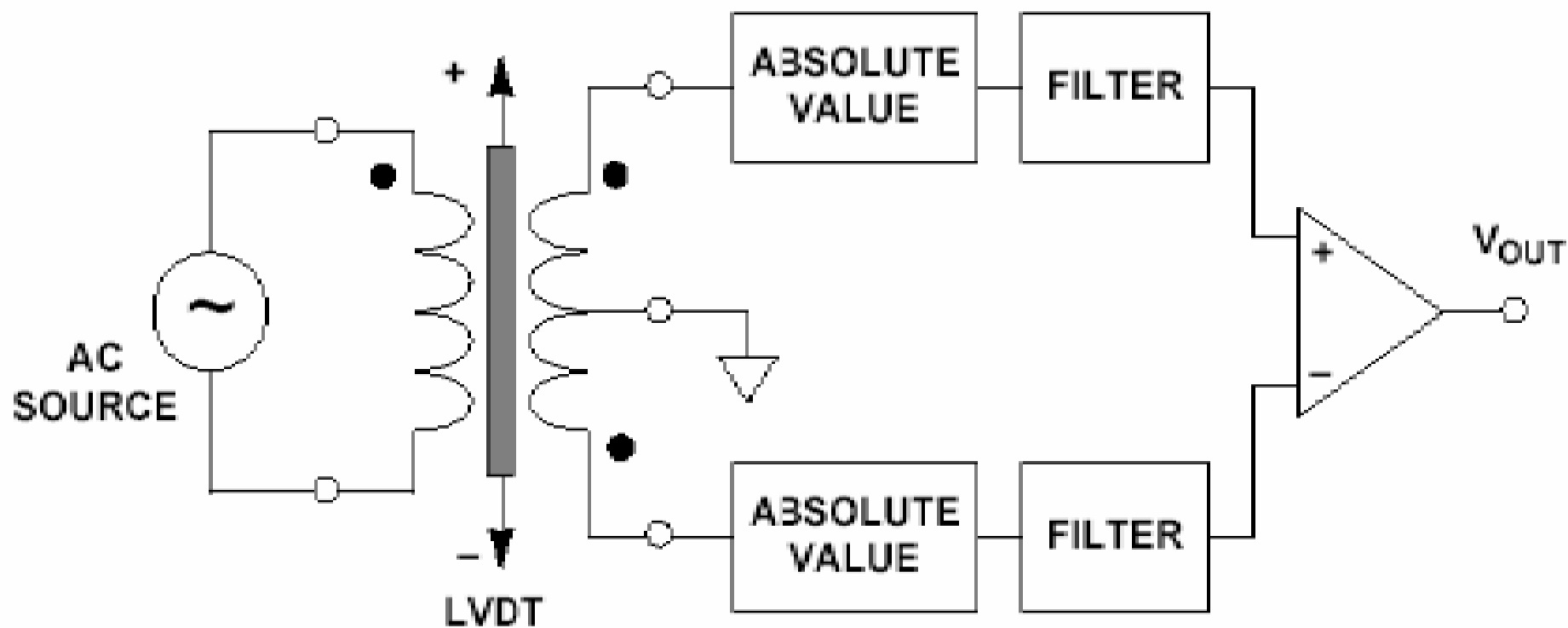
(b)

Плътност на токовите линии в магнито-диод с обемно рекомбиниране. (a) Няма магнитно поле; (b) Приложено е магнитно поле перпендикулярно на равнината на чертежа. Тогава и електроните ● и дупките ○ са деформирани към една и съща страна на плочата и токовите линии стават по-дълги.

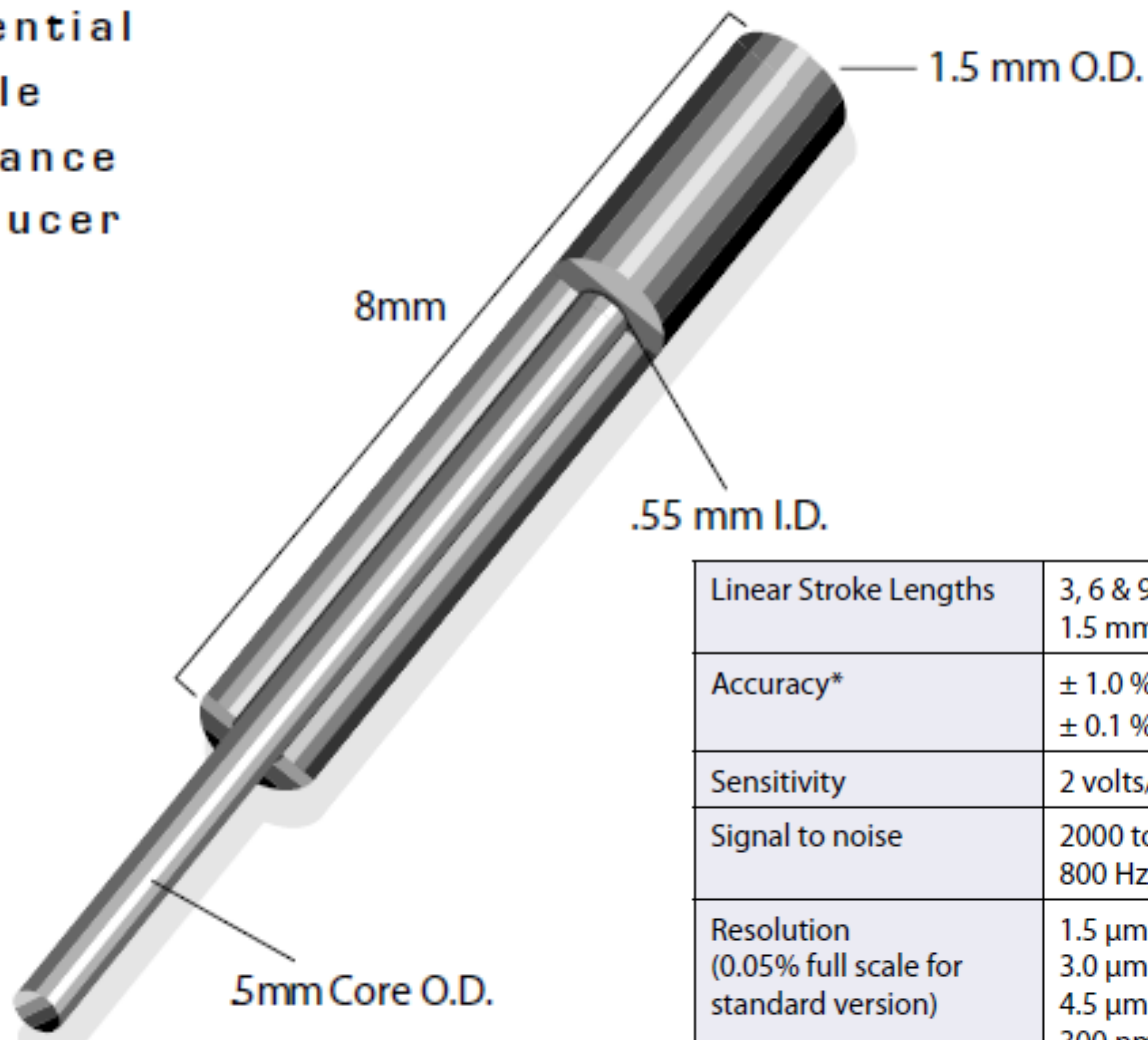


# LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER (LVDT)

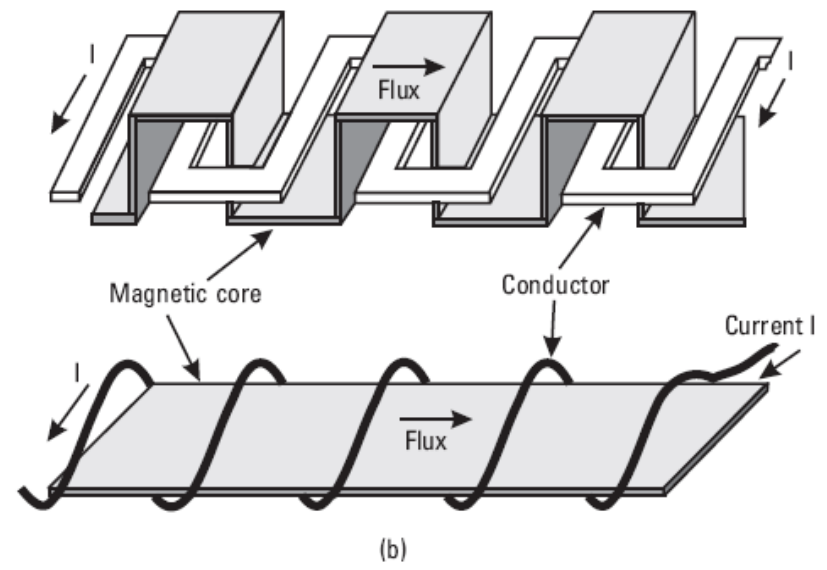
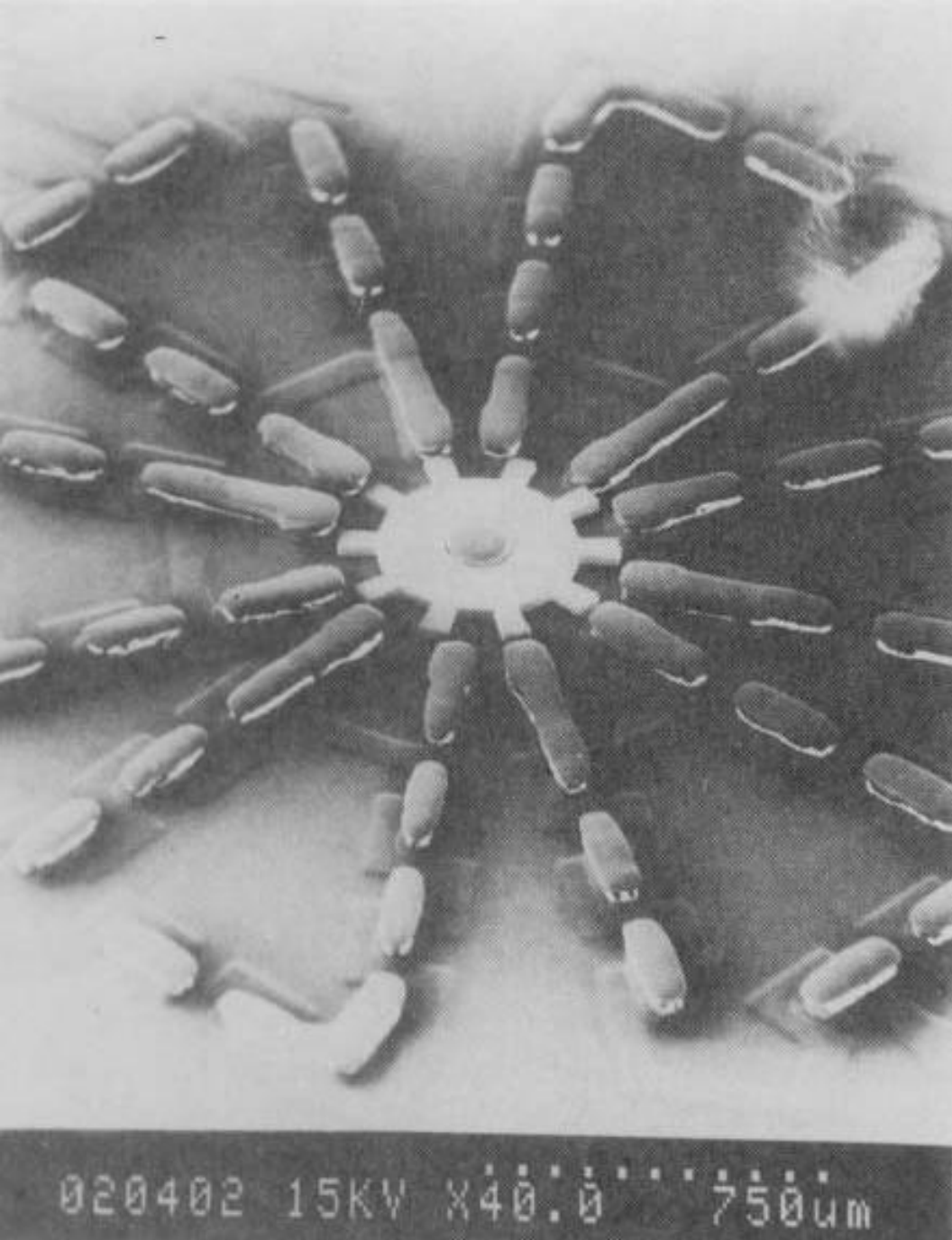


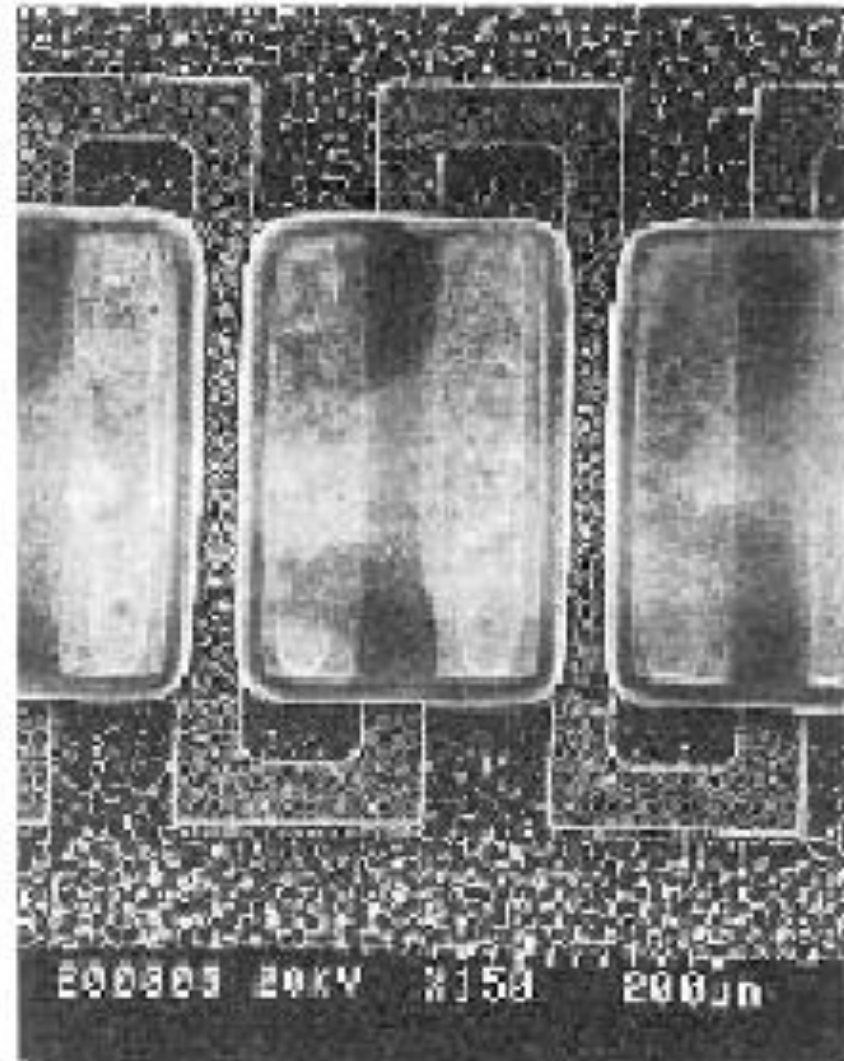
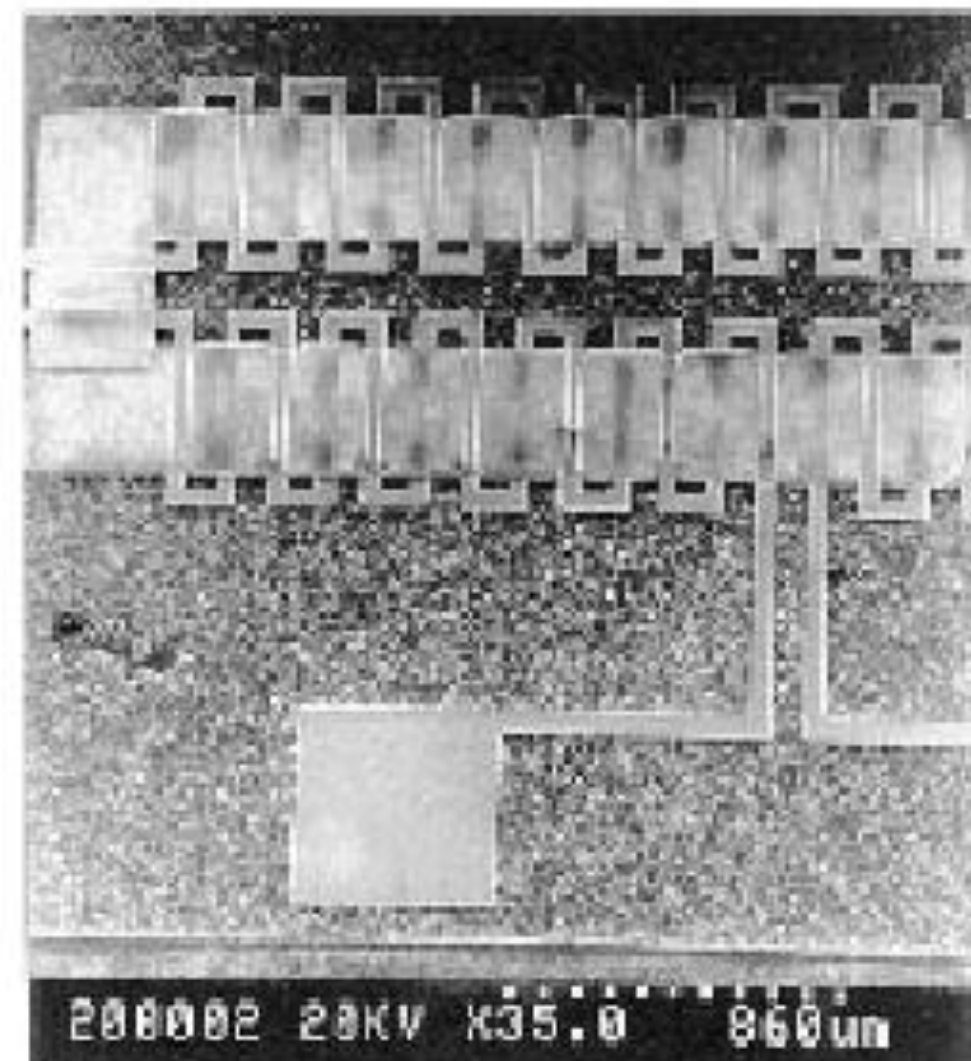


# Differential Variable Reluctance Transducer



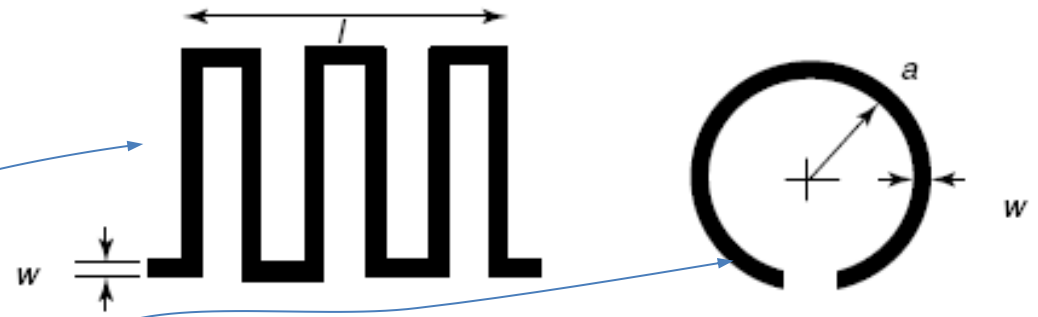
Linear Stroke Lengths	3, 6 & 9 mm (standard version) 1.5 mm (high resolution version)
Accuracy*	± 1.0 % using straight line ± 0.1 % using polynomial
Sensitivity	2 volts/mm typical
Signal to noise	2000 to 1 (with filter 3 dB down at 800 Hz, standard)
Resolution (0.05% full scale for standard version)	1.5 µm for 3 mm stroke 3.0 µm for 6 mm stroke 4.5 µm for 9 mm stroke 300 nm for high resolution version
Frequency response	7 KHz (unfiltered)
Temperature coefficient	offset 0.0029%/ °C (typical) span 0.030%/ °C (typical)
Hysteresis*	± 1 micron
Repeatability*	± 1 micron





# MEMS индуктори

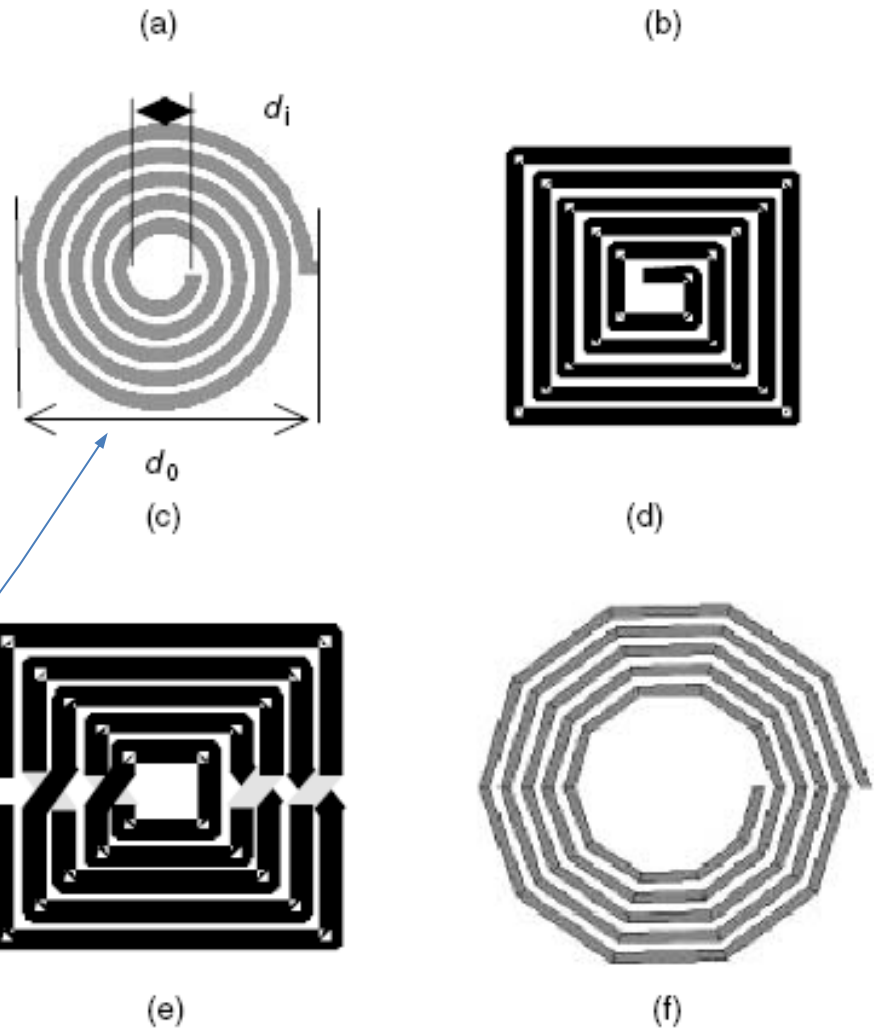
- а) меандър
- б) контур
- в) кръгла спирала
- г) квадратна спирала
- д) симетрична спирала
- е) спирала полигон



$$L = 2l \left[ \ln \left( \frac{l}{w+t} \right) + 0.22 \frac{w+t}{l} + 1.19 \right]$$

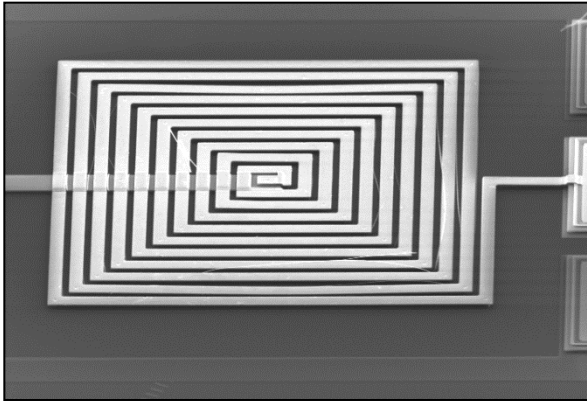
$$L = 4\pi a \left[ \ln \left( \frac{8\pi a}{w} \right) - 2 \right]$$

$$L = \frac{394a^2 N^2}{8a + 11c}$$

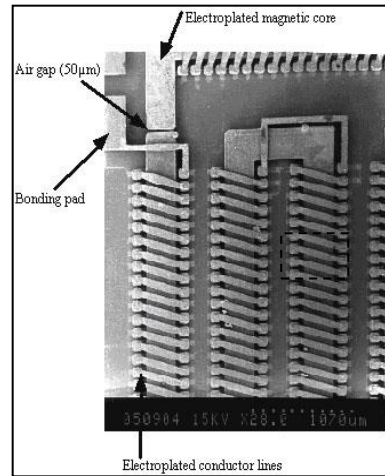


- Многослойно галванизиране

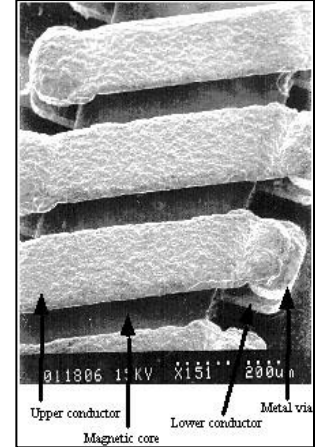
– обикновено Cu или Au



Planar spiral coil



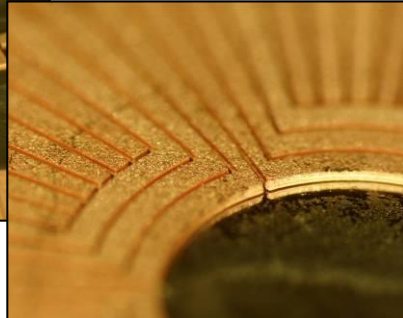
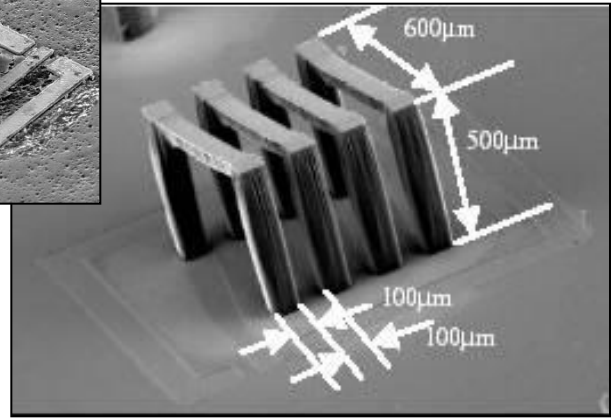
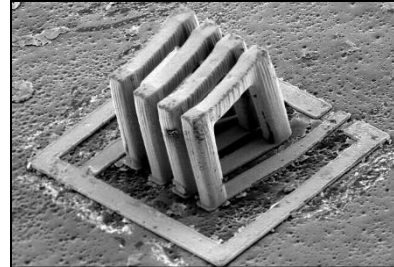
NiFe-core inductor [J. Y. Park, 1998].

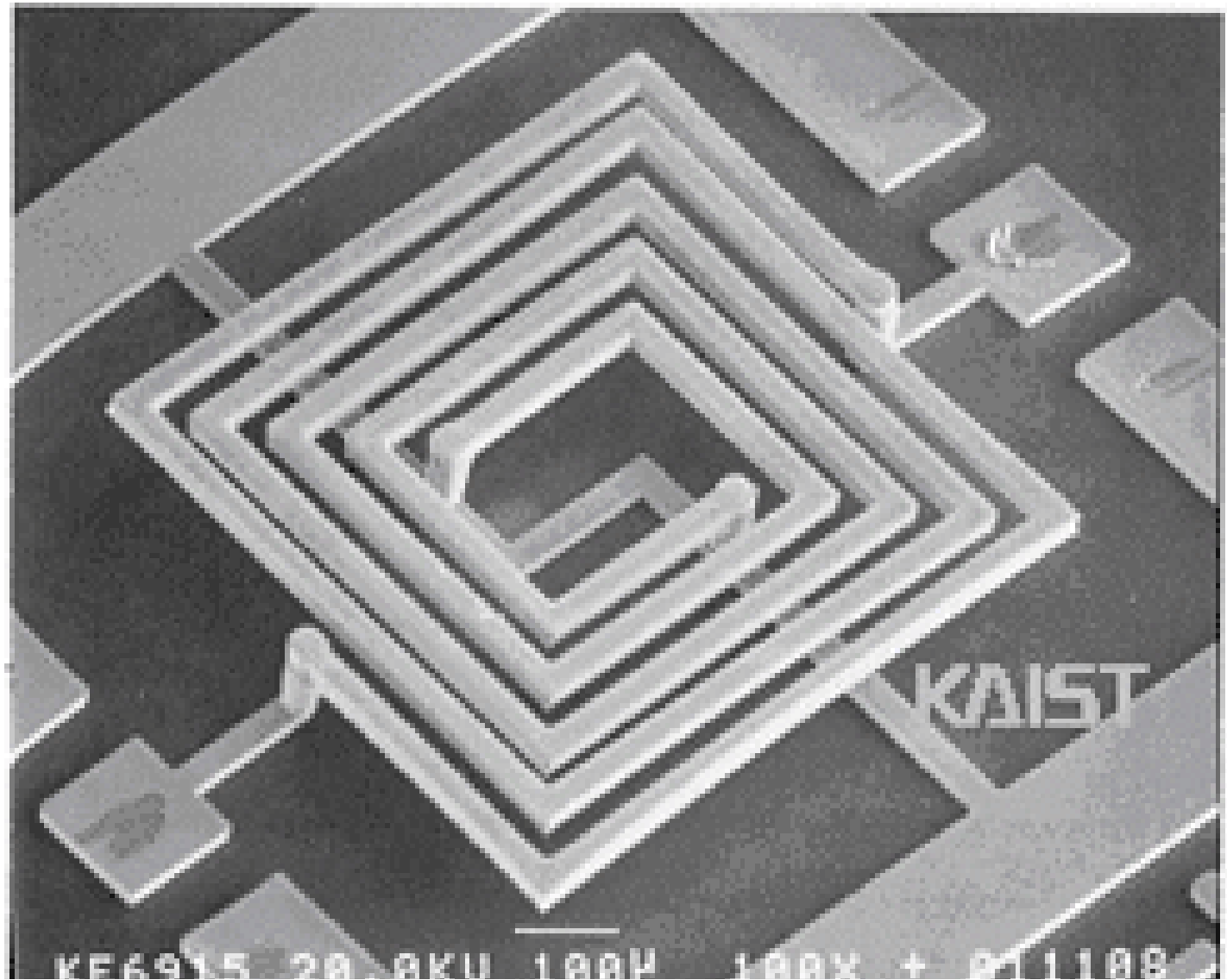


3D air core RF inductors [Y.-K. Yoon, 2003].



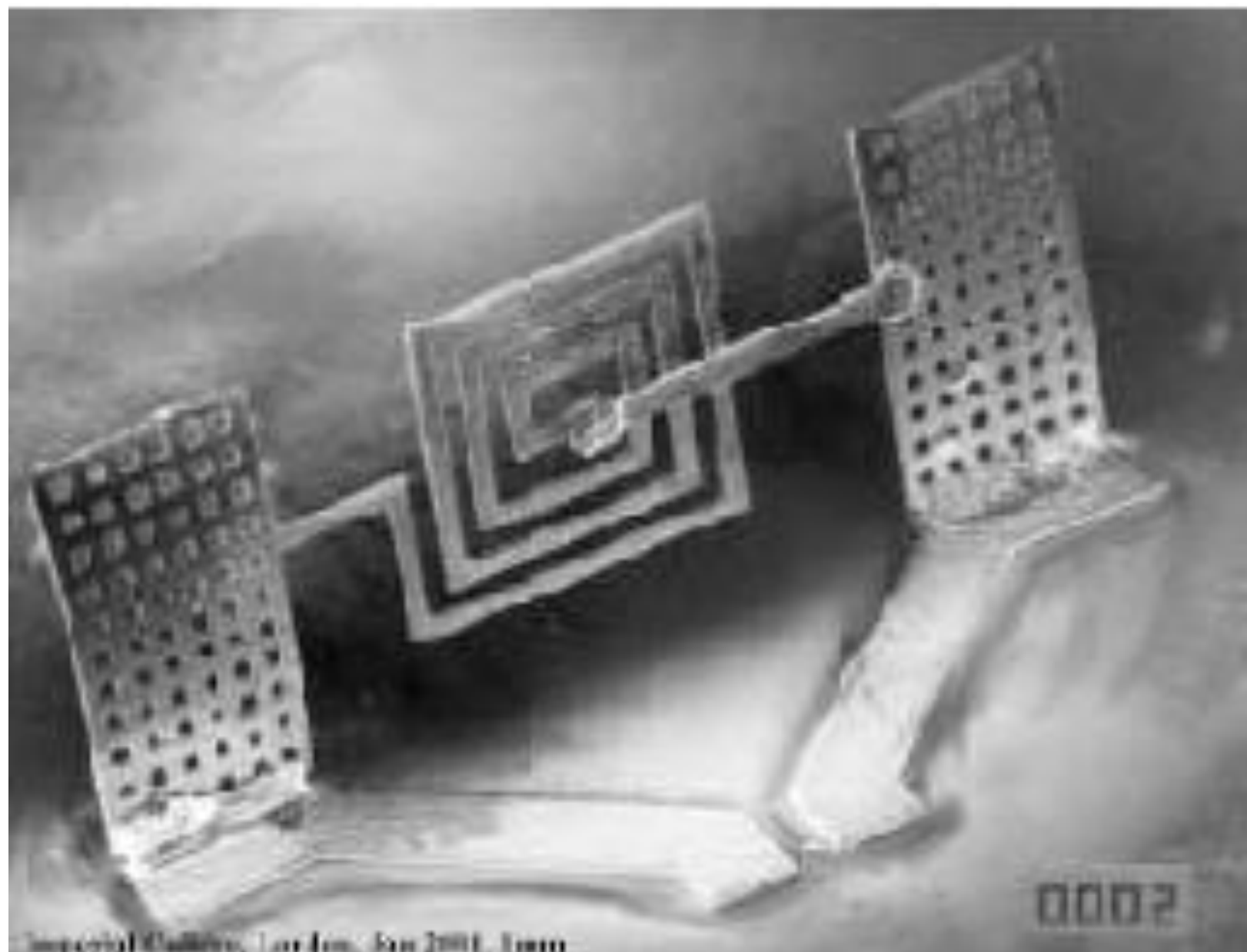
Planar Cu windings





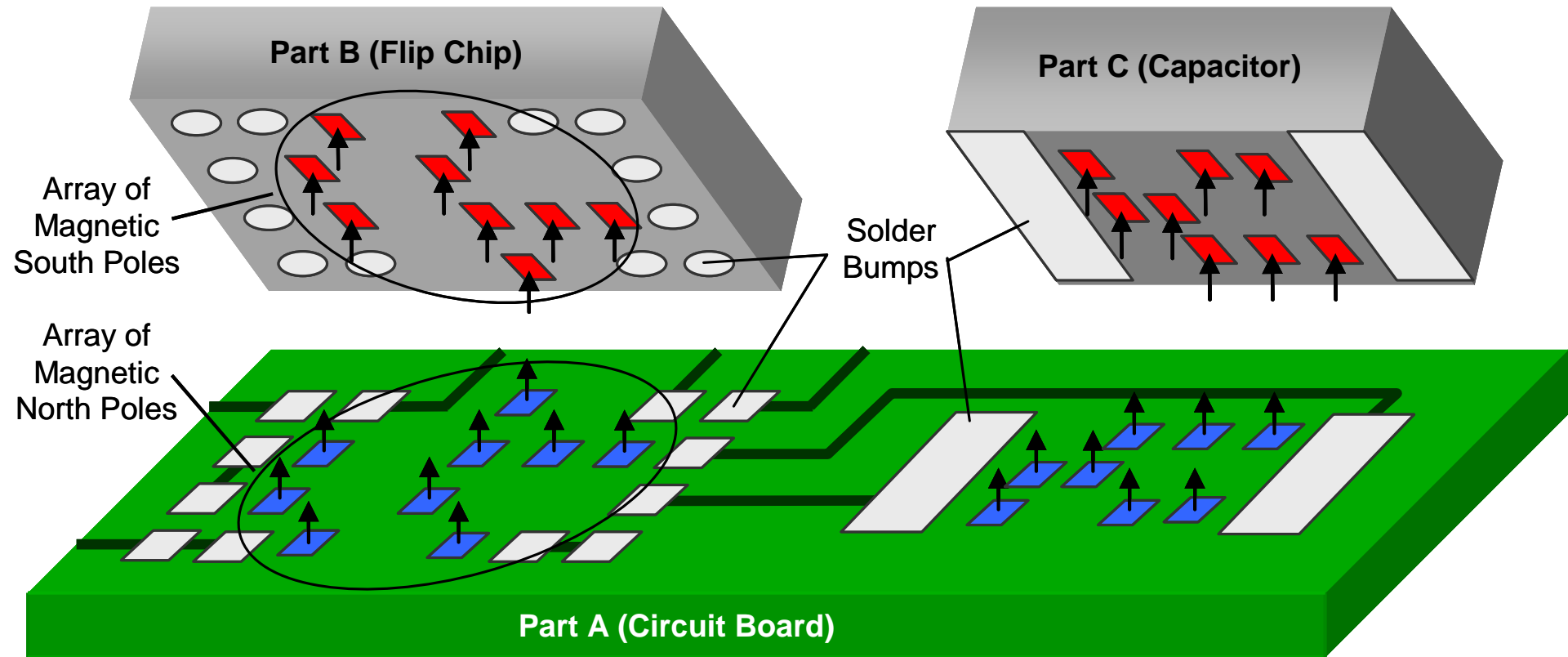
***High-Performance MEMS Transformers***





Imperial College, London, Jan 2001, 1000

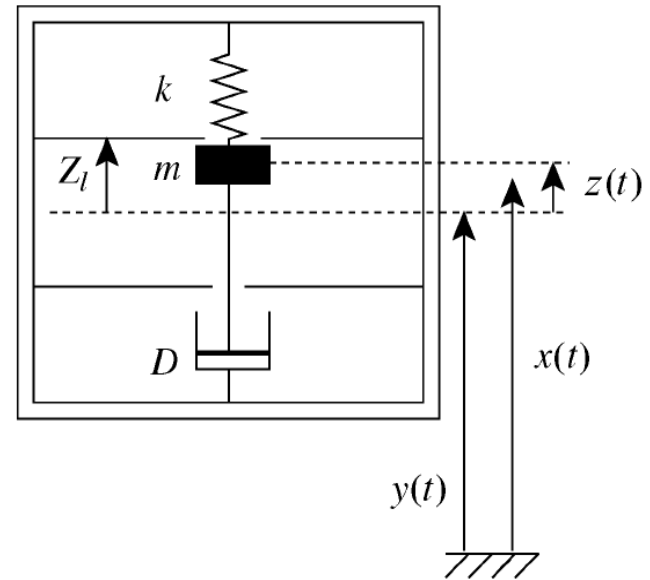
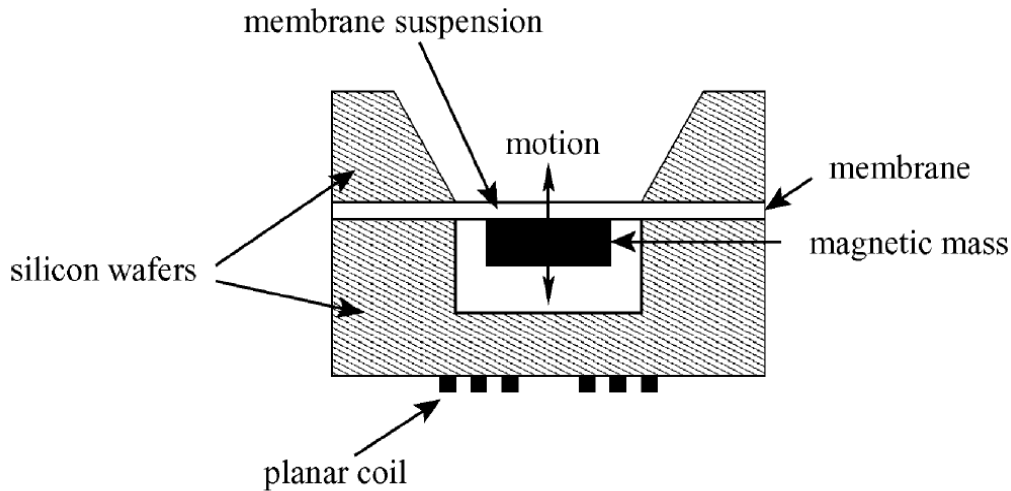
# Magnetic Self-Assembly



- Bonding structures much smaller than the size of the component
- “Lock and Key” pattern-matching mechanism
- Asymmetric and diverse patterns

# Vibrational Magnetic Generators

- Theoretical Performance Estimates



$$P \propto m Y_0^2 \omega_n^2$$

- Human Powered:  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$  range (1-10 Hz)
- Vibrating Structure:  $\text{mW}/\text{cm}^3$  range (0.1-1 kHz)

P. D. Mitcheson, et al., “Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators”, Journal of MEMS, vol. 13, no. 3, June 2004.

# Литература

1. Vijay K. Varadan K.J. Vinoy K.A. Jose, RF MEMS and Their Applications, John Wiley & Sons Ltd, 2003 *Pennsylvania State University, USA*
2. Edward P. Furlani, Permanent Magnet and Electromechanical Devices,, Academic Press, 2001.
3. *Osamu Tabata and Toshiyuki Tsuchiya*, Reliability of MEMS, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

