



Магнитные материалы

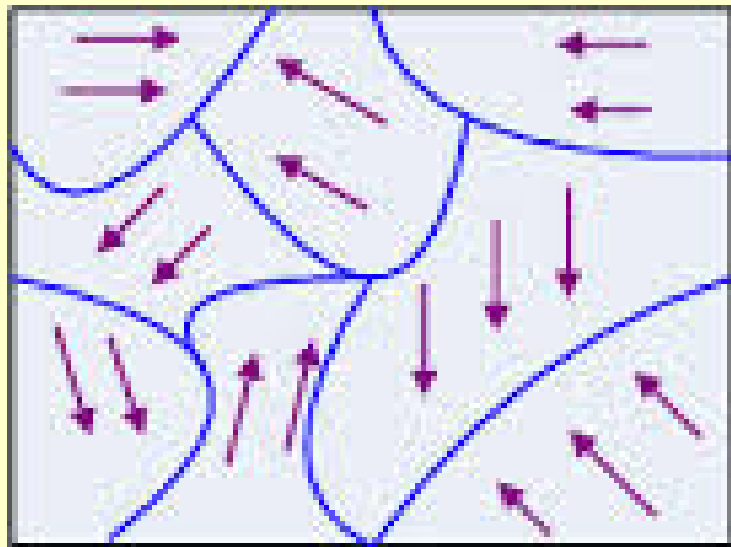
Перов Николай Сергеевич



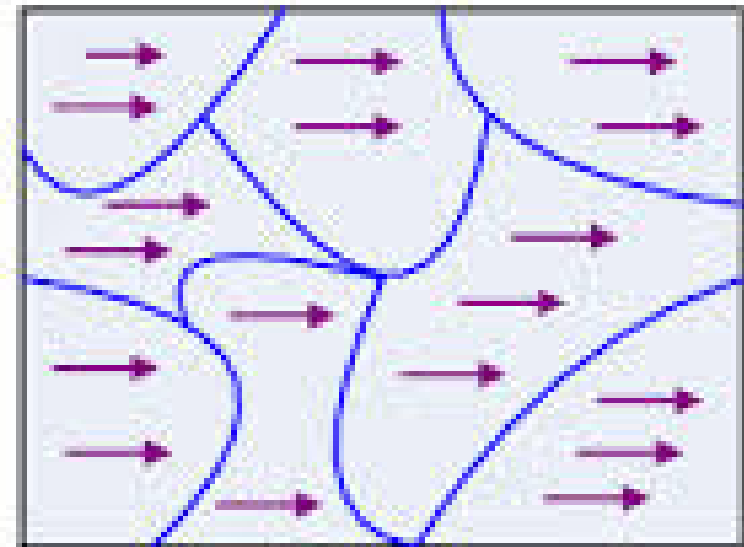
- Магнитномягкие материалы
- Магнитнотвердые материалы
(Постоянные магниты)
- Микромагнетизм
- Электрические машины
- Магнитные датчики



Ферромагнетики



А)



Б)

\vec{B}_0



Магнитномягкие материалы

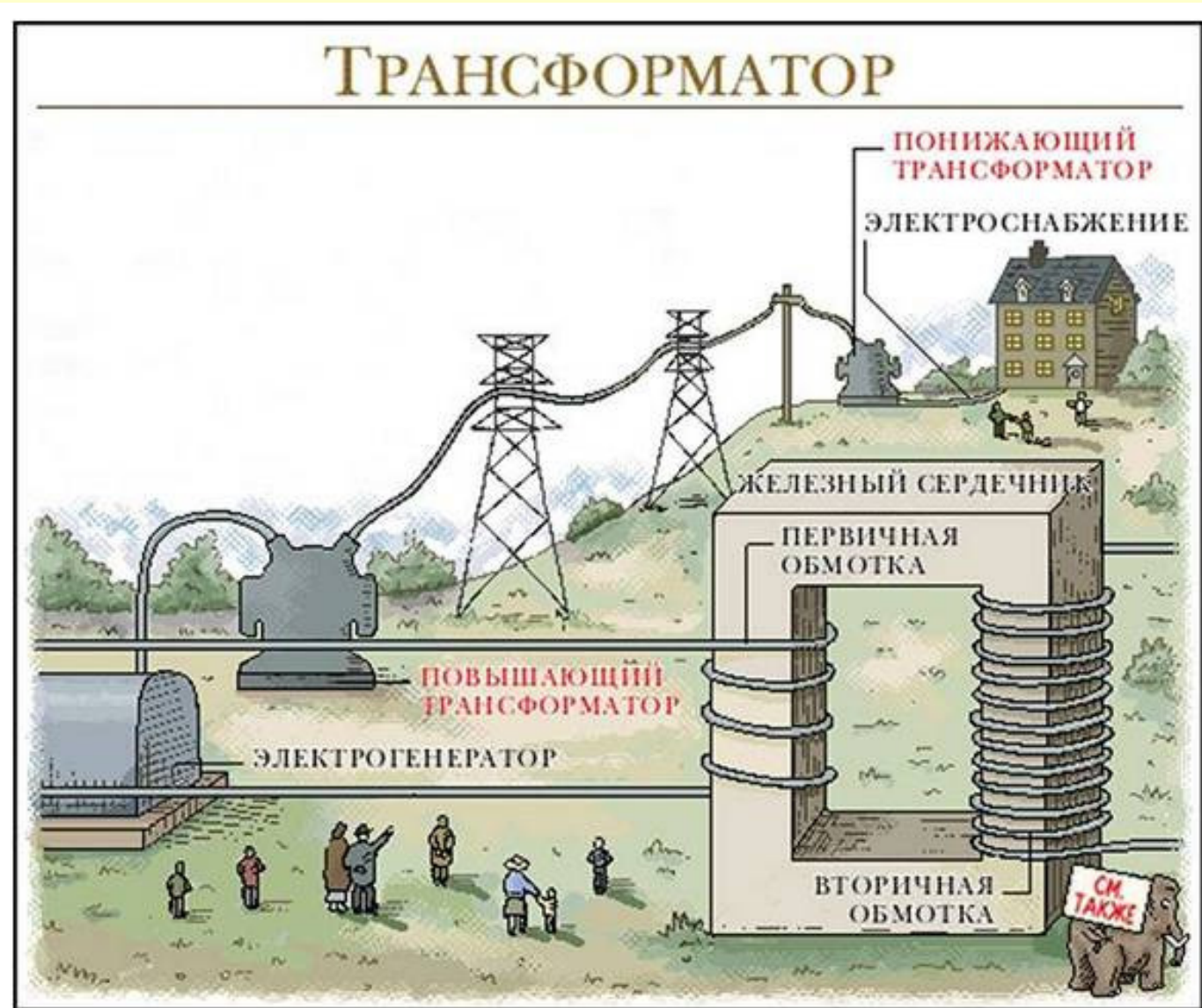
- Электротехнические стали
- Пермаллой и альсифер (сендаст)
- Альсиферовые и карбонильные материалы
- Магнитномягкие ферриты
- Аморфные сплавы

Использование магнитномягких сплавов



- Электрические трансформаторы
- Электрические машины
- Информационные технологии
- Электроника, радиосвязь и радиолокация
- Медицина
- Автомобильная, электротехническая и химическая промышленность

Передача электроэнергии



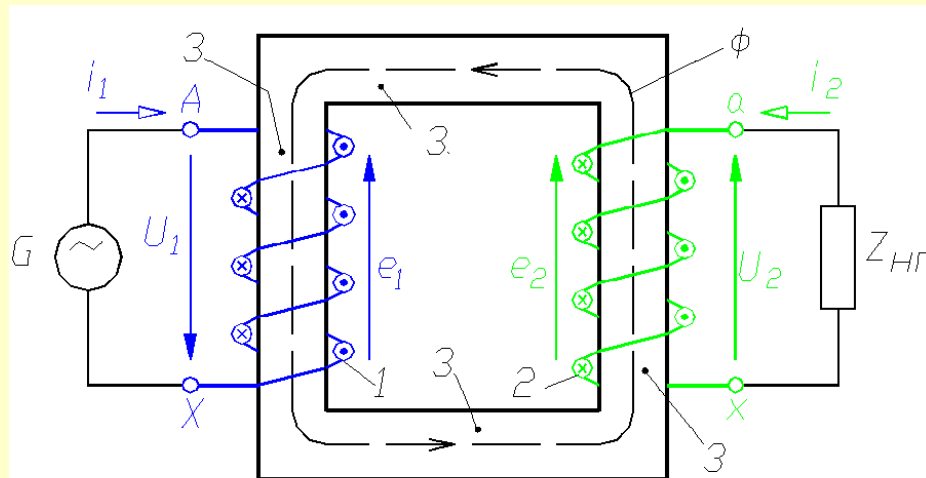


Устройство трансформатора





Устройство трансформатора



Принцип работы трансформатора.

1 - первичная обмотка; 2 - вторичная обмотка; 3 - магнитопровод

$$\Phi = BS = \mu H S_0 n$$

$$H = \frac{nI}{L}$$

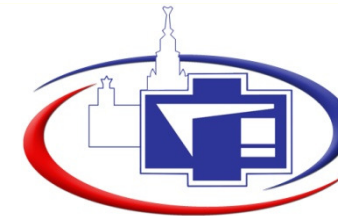
$$E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Магнитотвердые материалы (материалы для постоянных магнитов)



- Углеродистые стали
- Алнико
- Магнитотвердые ферриты (феррит бария)
- SmCo
- NdFeB
- FeAu-FePt

Основные свойства постоянных магнитов



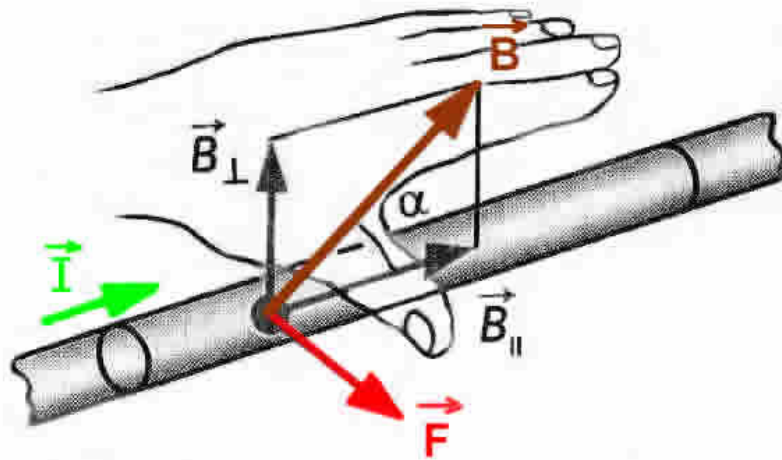
Тип магнита	Остаточная индукция (кГаусс)	Коэрцитивная сила (кЭ)	Магнитная энергия (МГЭ)
Углеродистые стали	4 - 8	0.3 - 1	0.3 - 1
Алнико	7 - 13	0.6 – 1.9	1.4 – 7.5
Ферриты	1 - 4	2 - 4	1.1 – 4.5
SmCo	8 - 11	8 - 10	18 - 32
NdFeB	10 - 14	12	10 - 50
FeAu-CoPt	6-10	20 – 40	120

Использование постоянных магнитов

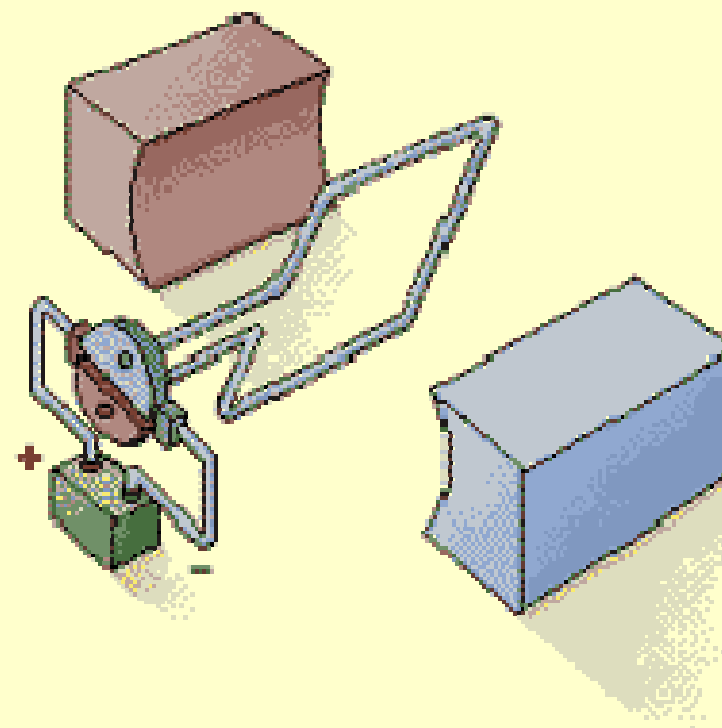
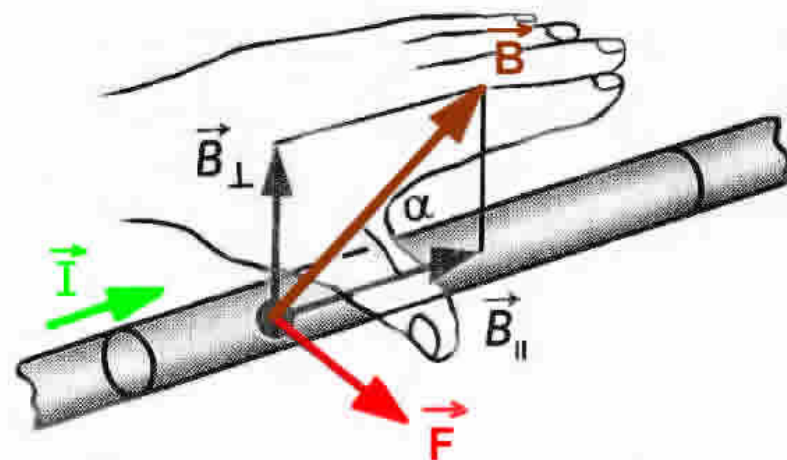
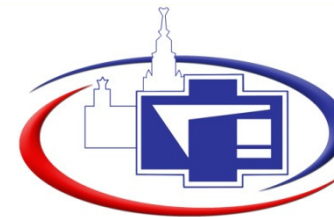


- Электродвигатели
- Громкоговорители и микрофоны
- Магнитные держатели
- Магнитные сепараторы
- Автомобили
- Счетчики

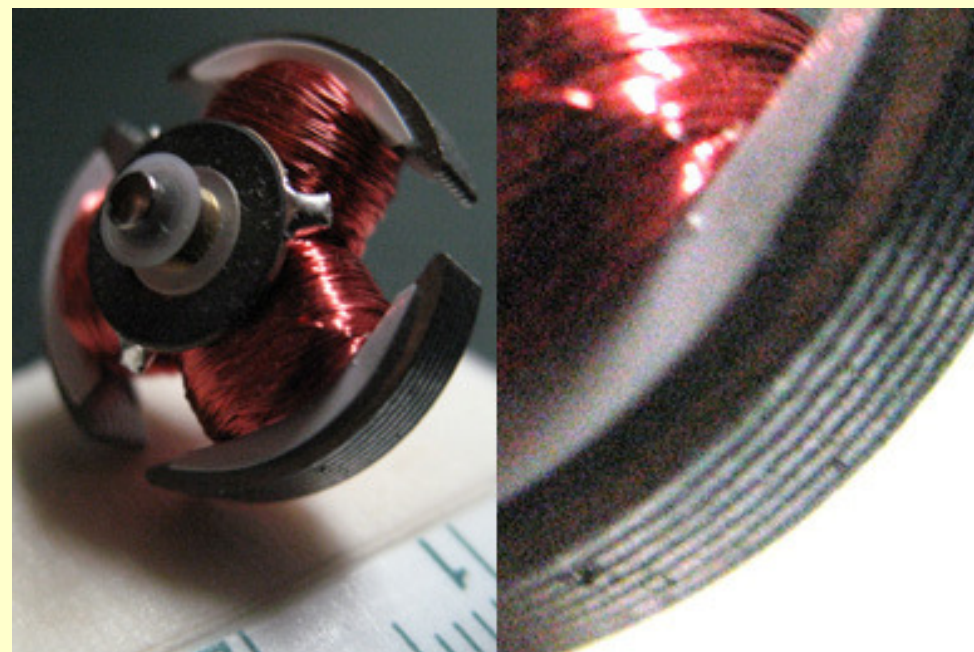
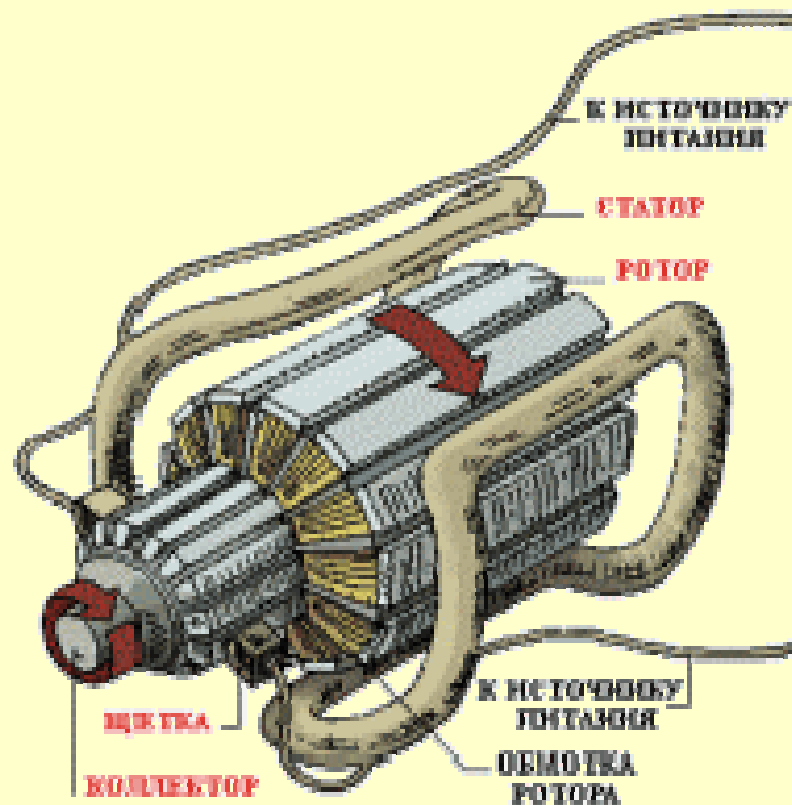
Электродвигатель



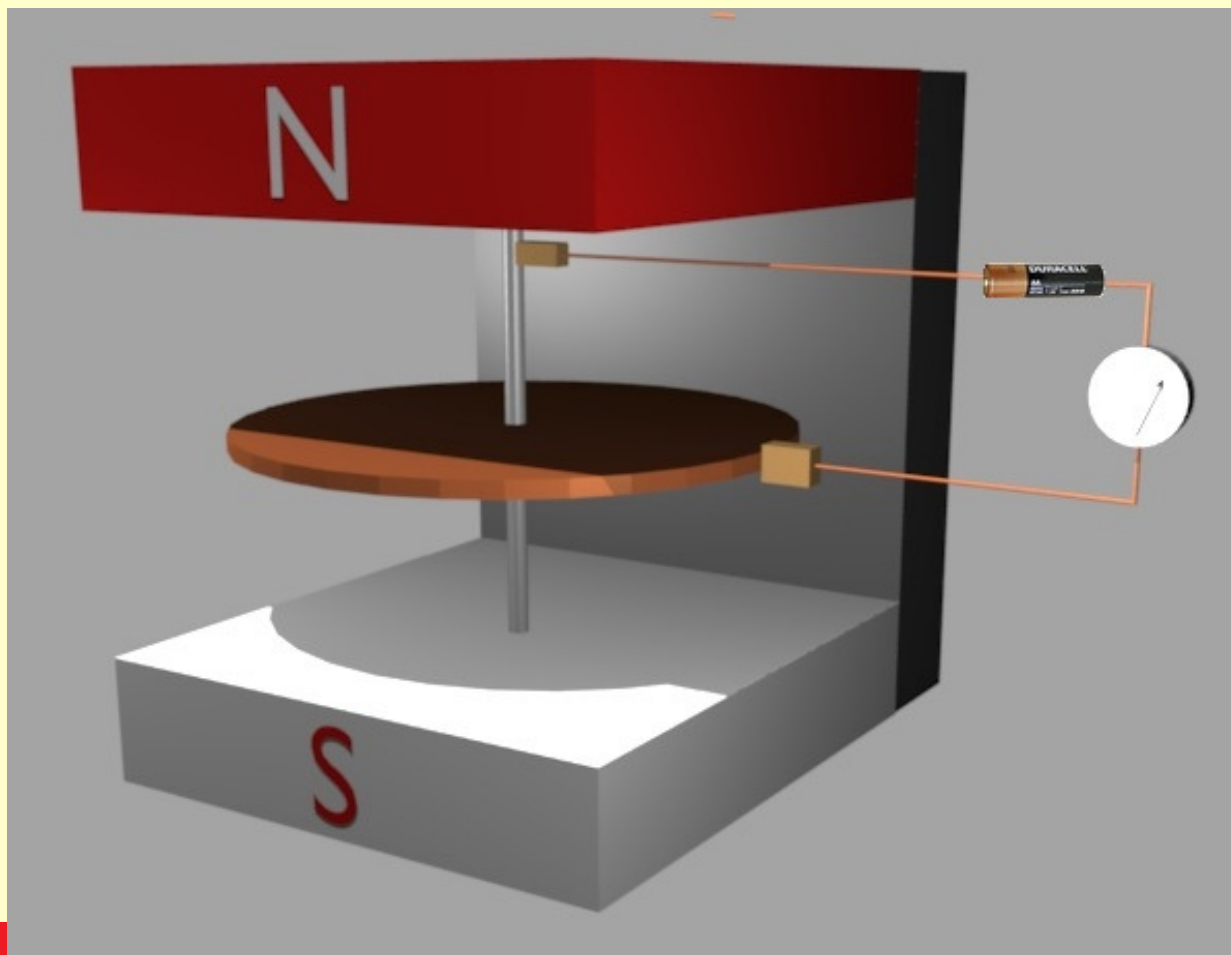
Электродвигатель



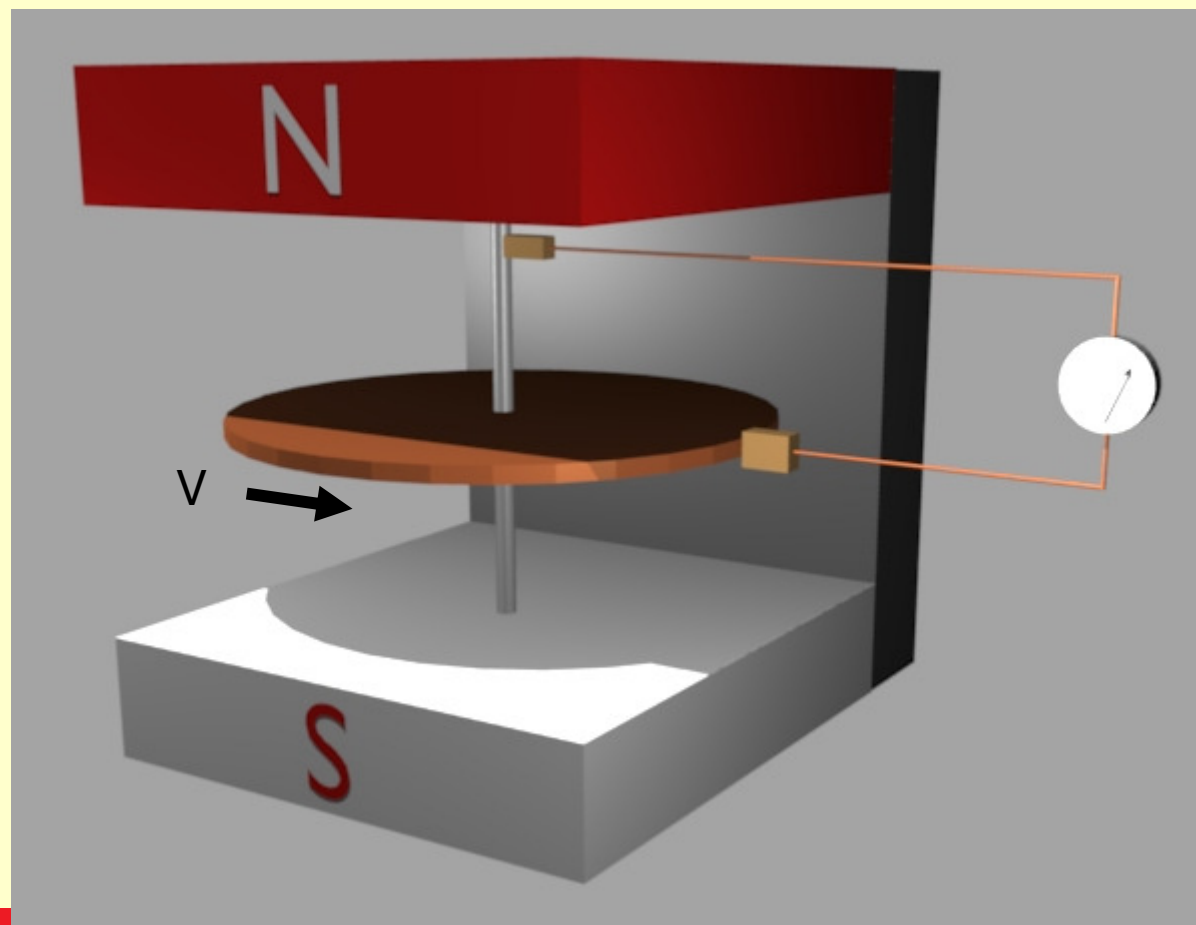
Электродвигатель



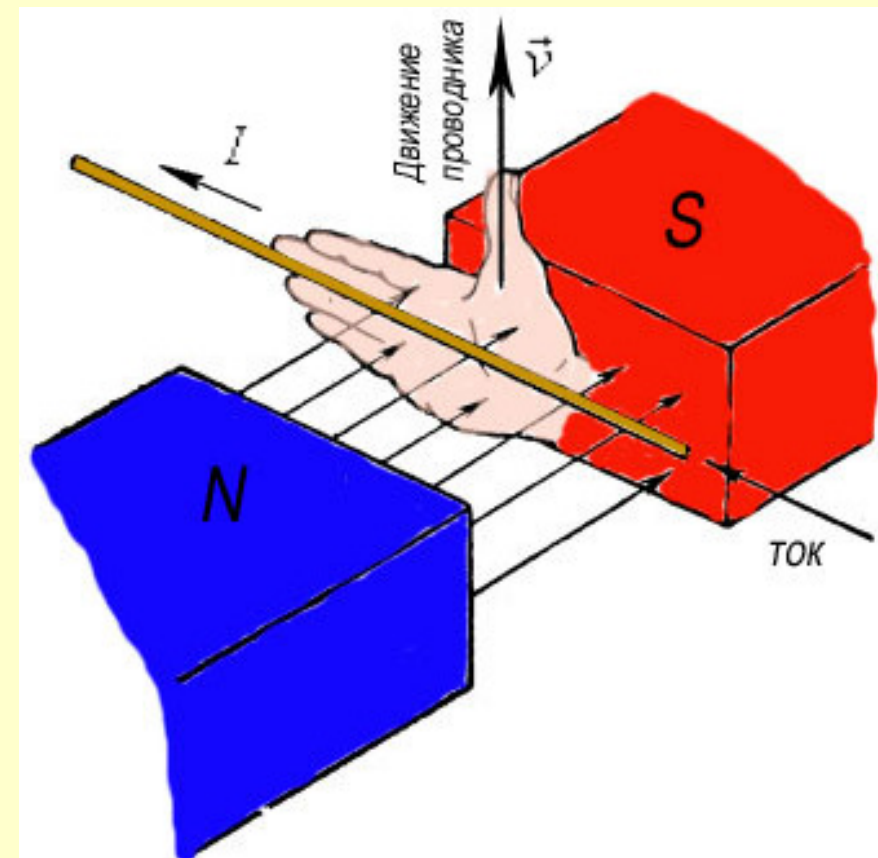
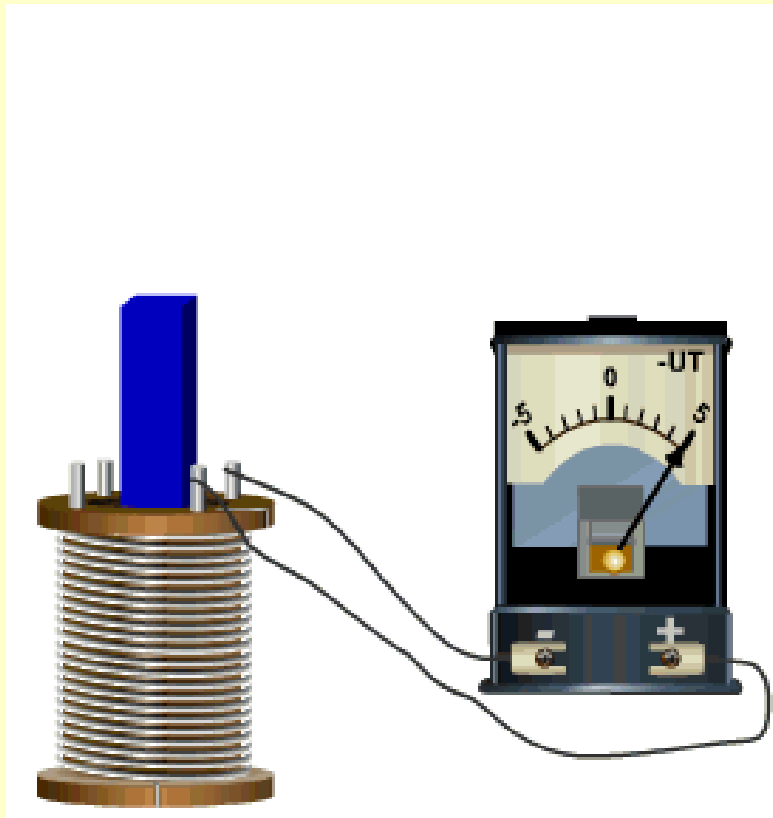
Электродвигатель



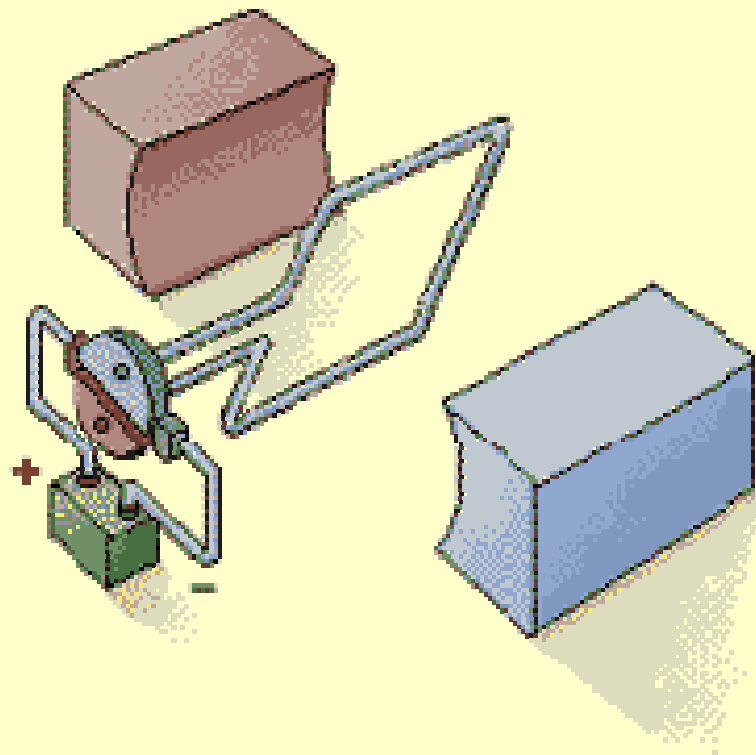
Электрогенератор



Электрогенератор



Электрогенератор



Магнитные эффекты



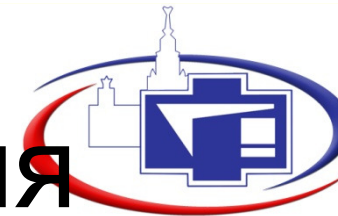
Эффект Джоуля	Эффект Фарадея	Эффект Маттиучи
Эффект Холла	Эффект Вилари	Эффект Керра
Магнетокалорический эффект	Эффект Гопкинсона	Эффект Барнетта
Эффект Эйнштейна-де-Гааза	Магнитоэлектрический эффект	Эффект Баркгаузена



Магнитные датчики

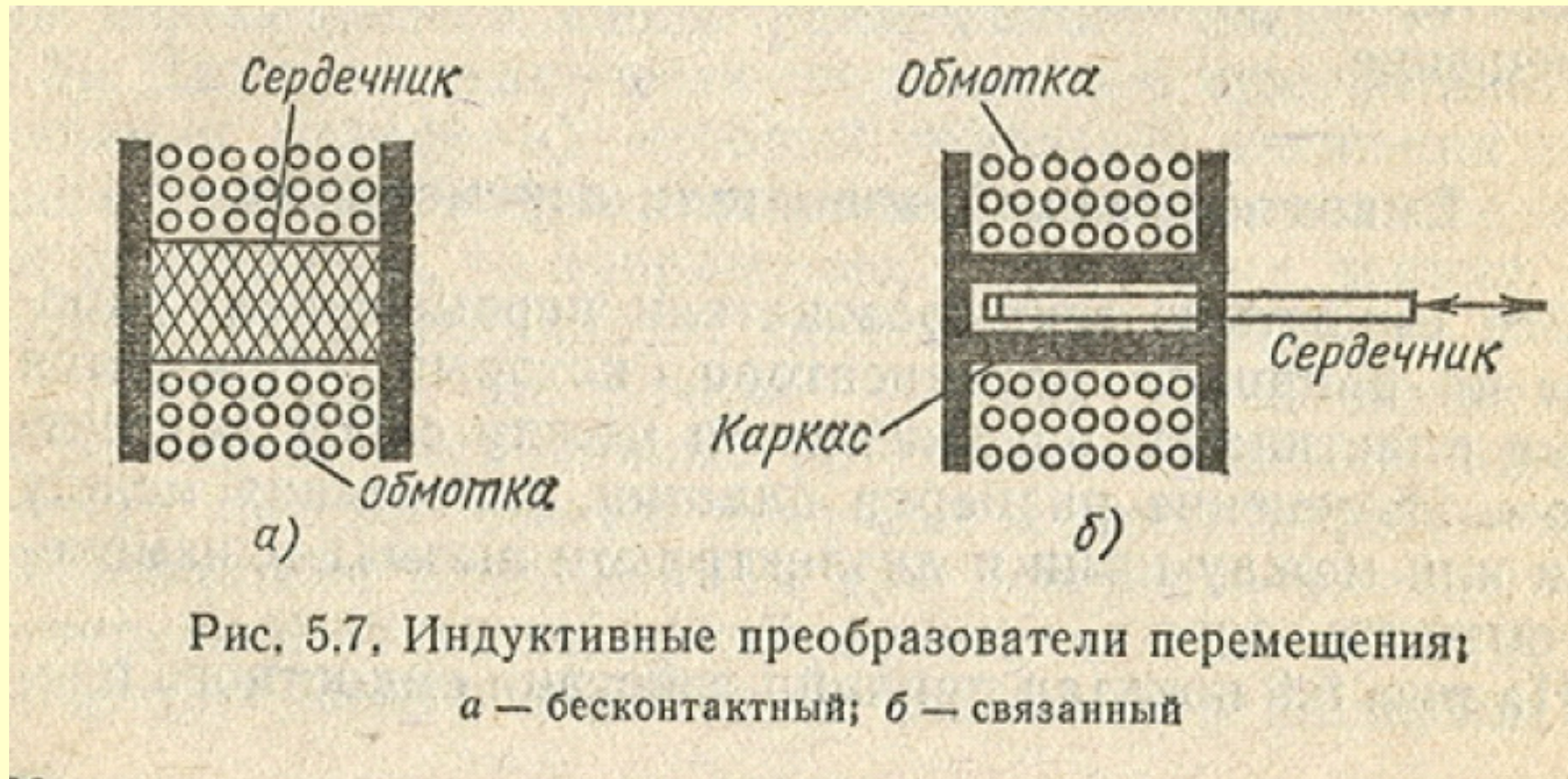
- ДАТЧИКИ или ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (эти слова для наших целей равнозначны) представляют собой устройства, преобразующие энергию физических воздействий в электрический ток или напряжение, необходимые для проведения измерений, контроля или получения информации о состоянии каких-либо параметров.

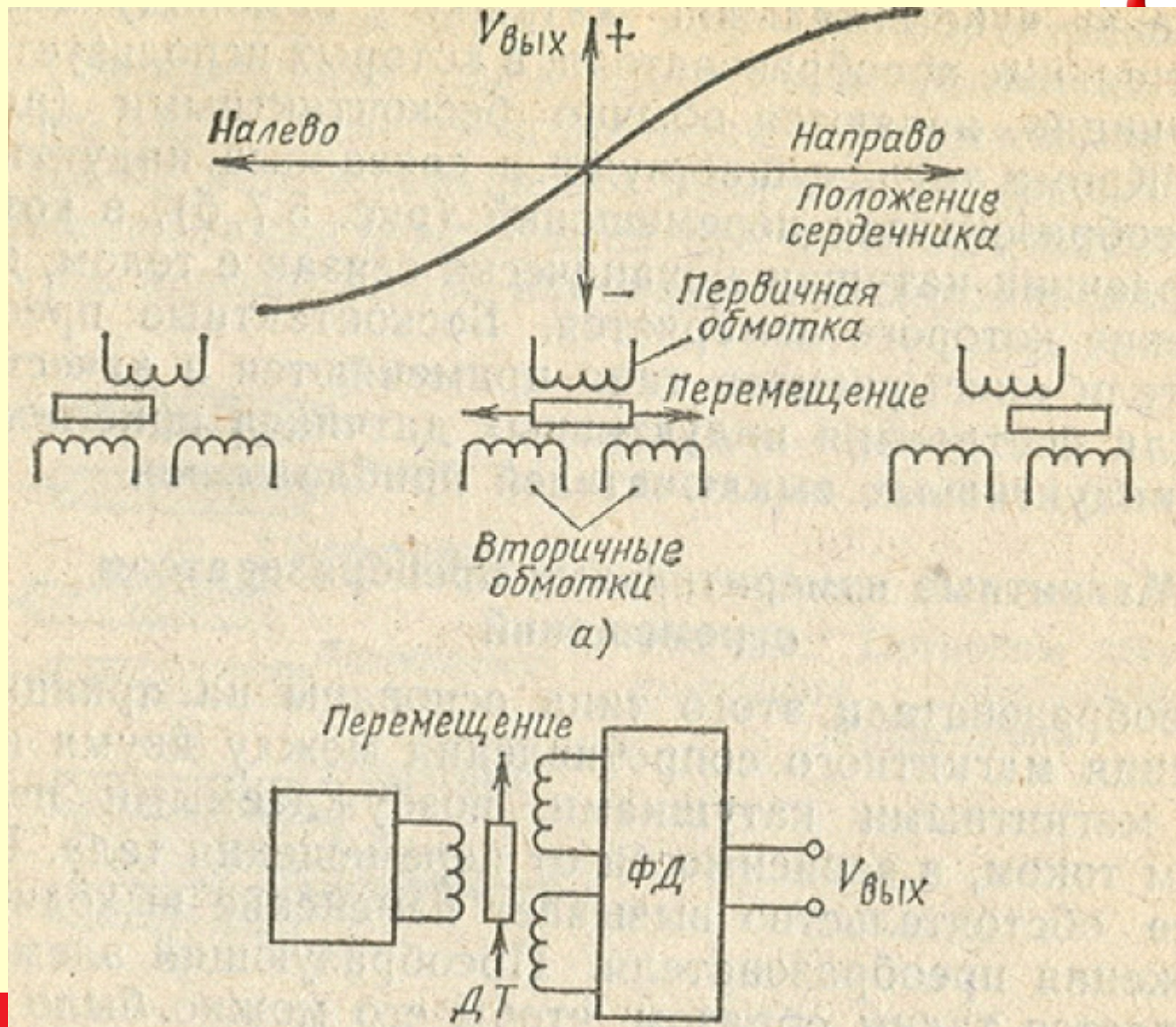
Датчики магнитного поля



Индукционные датчики	$10^{-8} - 10^7$ Э
Датчик на эффекте Холла	$10^{-4} - 10^6$ Э
Магниторезистивный датчик	$10^{-7} - 10^3$ Э
Магнитоимпедансный датчик	$10^{-8} - 10^2$ Э
Волоконно-оптический магнитометр	$10^{-9} - 10^2$ Э
Ядерно прецессионный магнитометр	$10^{-7} - 10^5$ Э
СКВИД магнитометр	$10^{-10} - 10^0$ Э

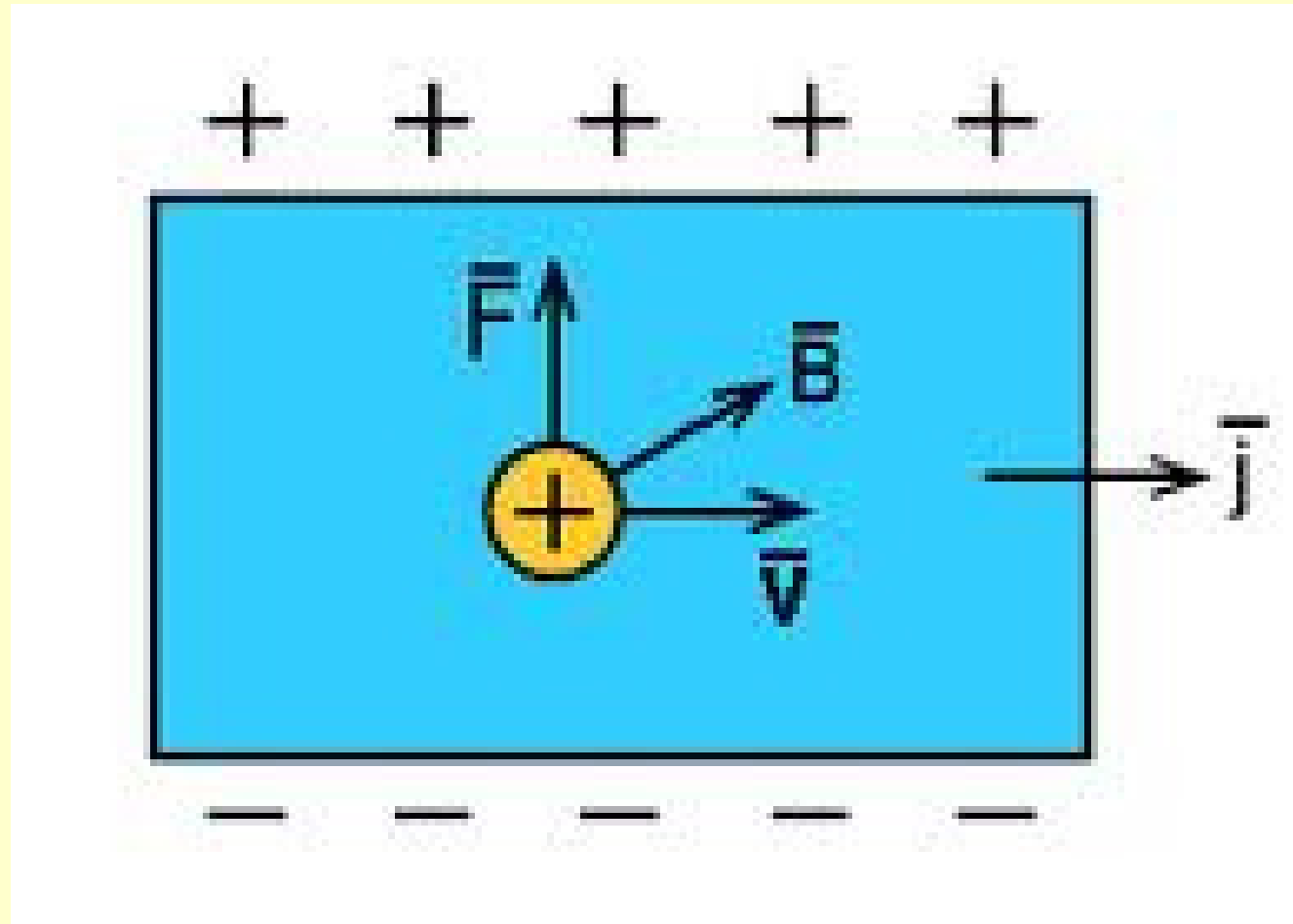
Магнитные датчики





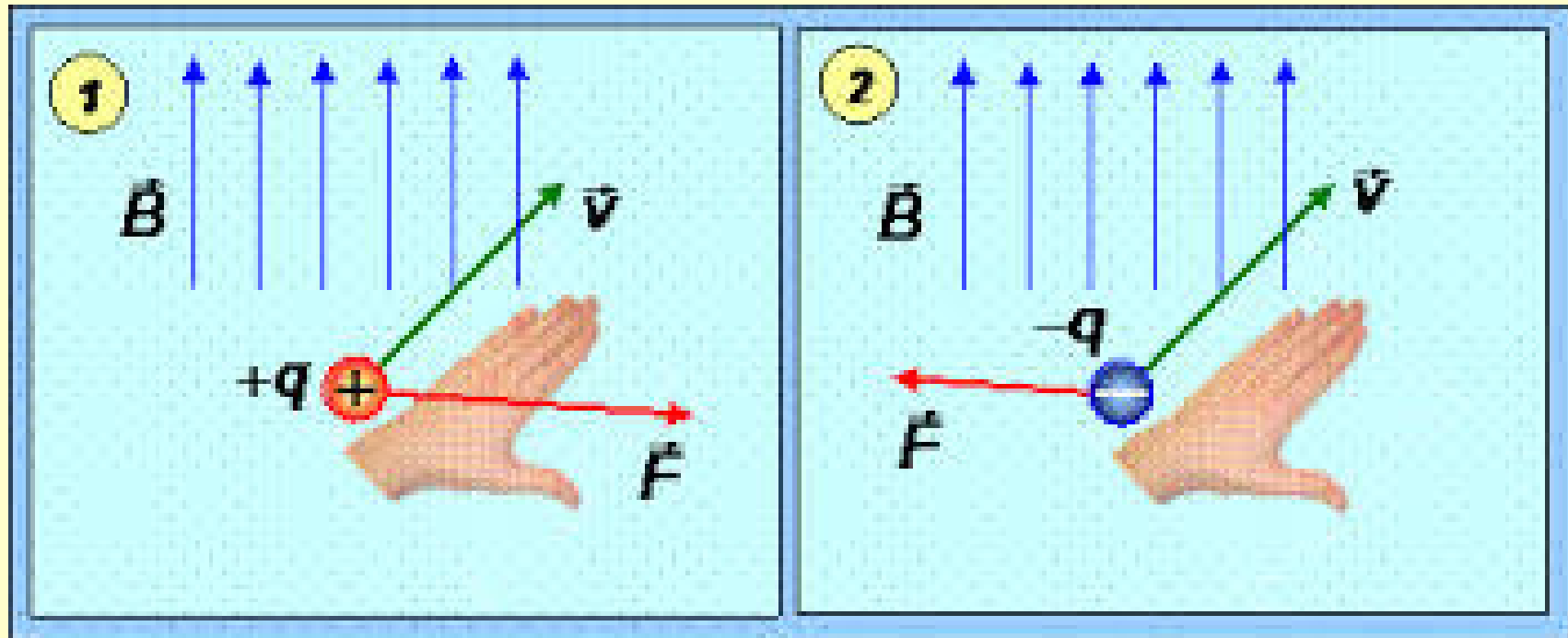


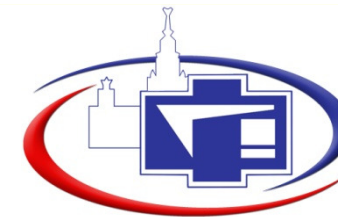
Датчик на эффекте Холла



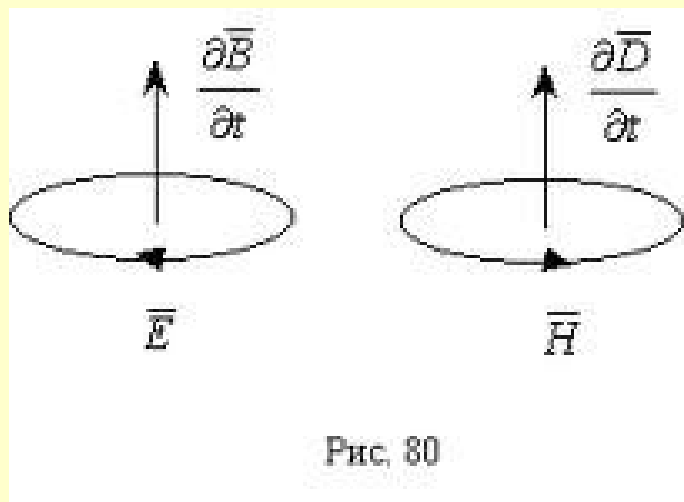


Сила Лоренца

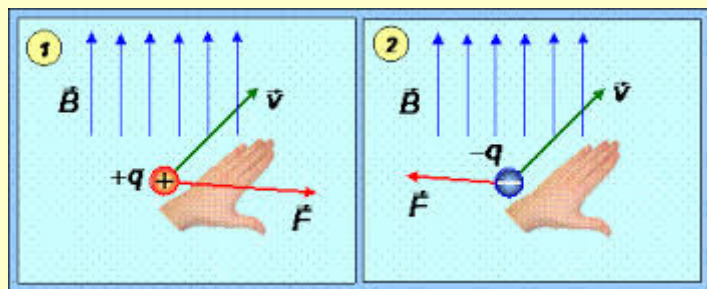




Сила Лоренца

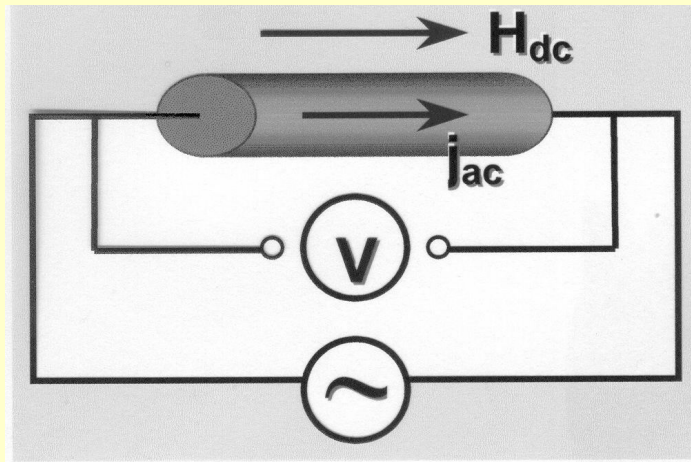


$$\operatorname{rot} E = - \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$



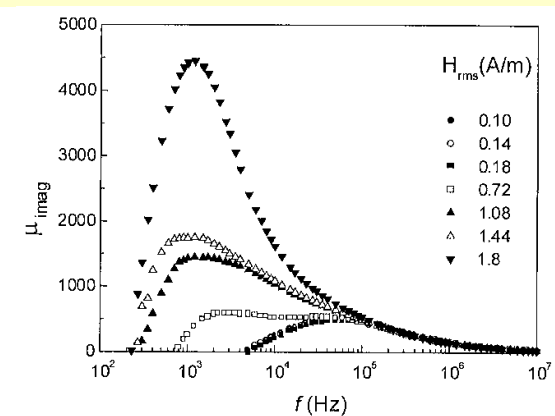
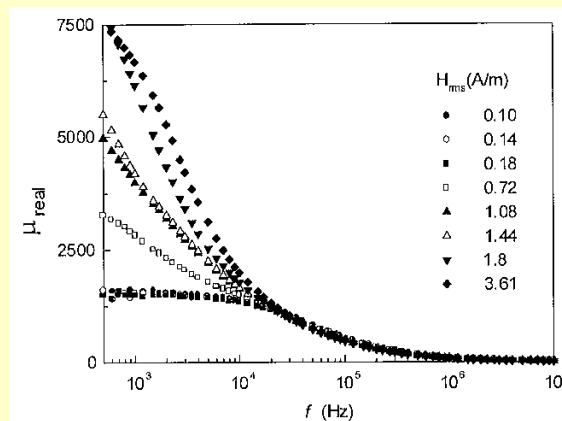
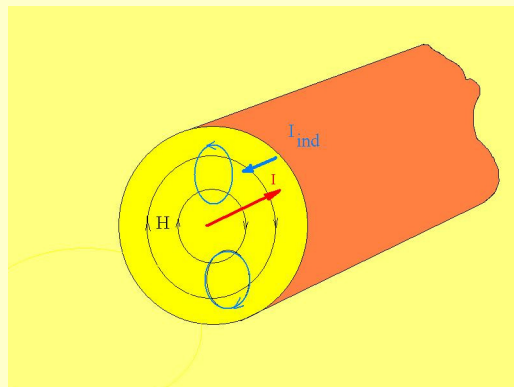


Низкочастотные ГМИ датчики



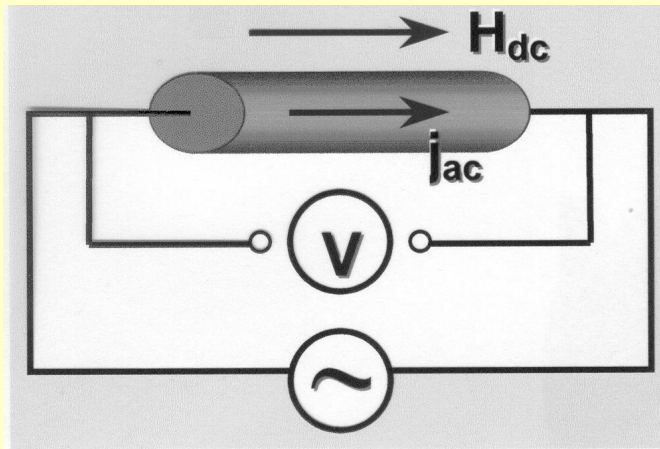
$$V = V_R + V_L = RI - \left(\frac{i\omega}{c^2} \right) L_i I$$

$$L_i = \frac{\mu_\phi l}{2}$$

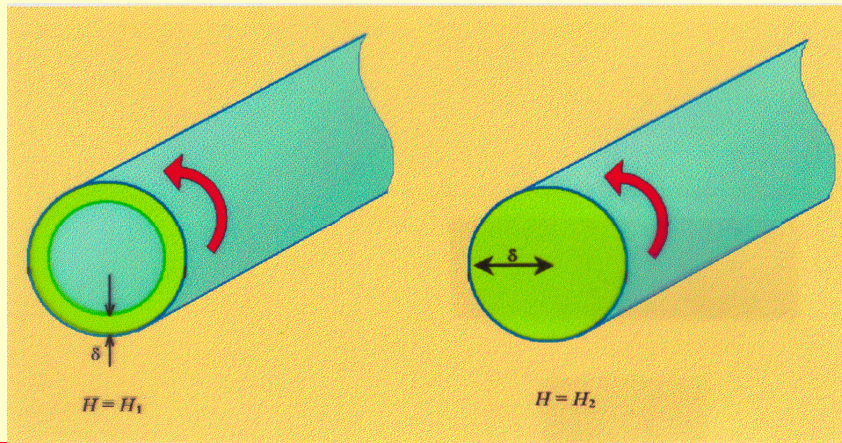




ГМИ датчики на средних частотах

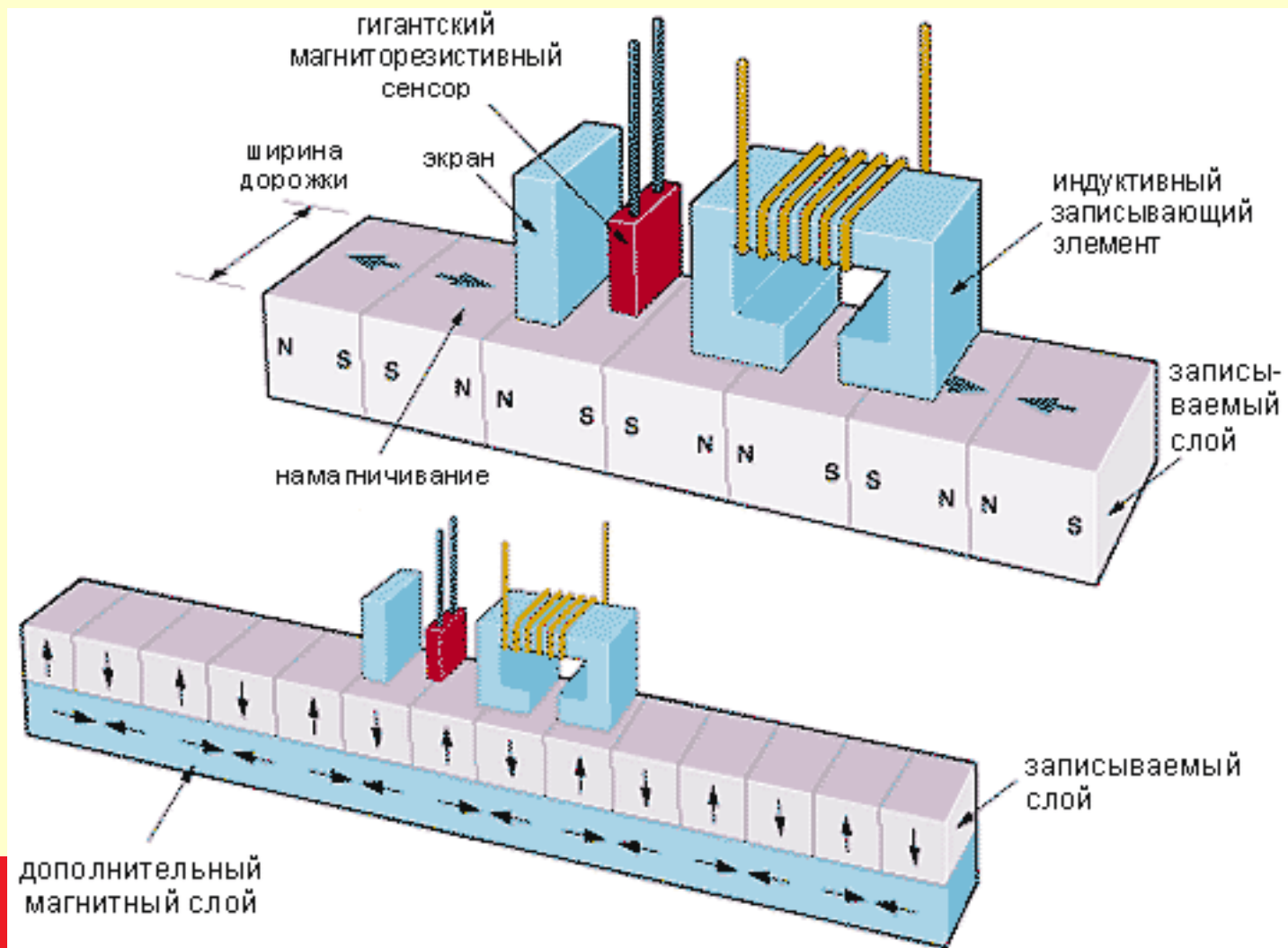


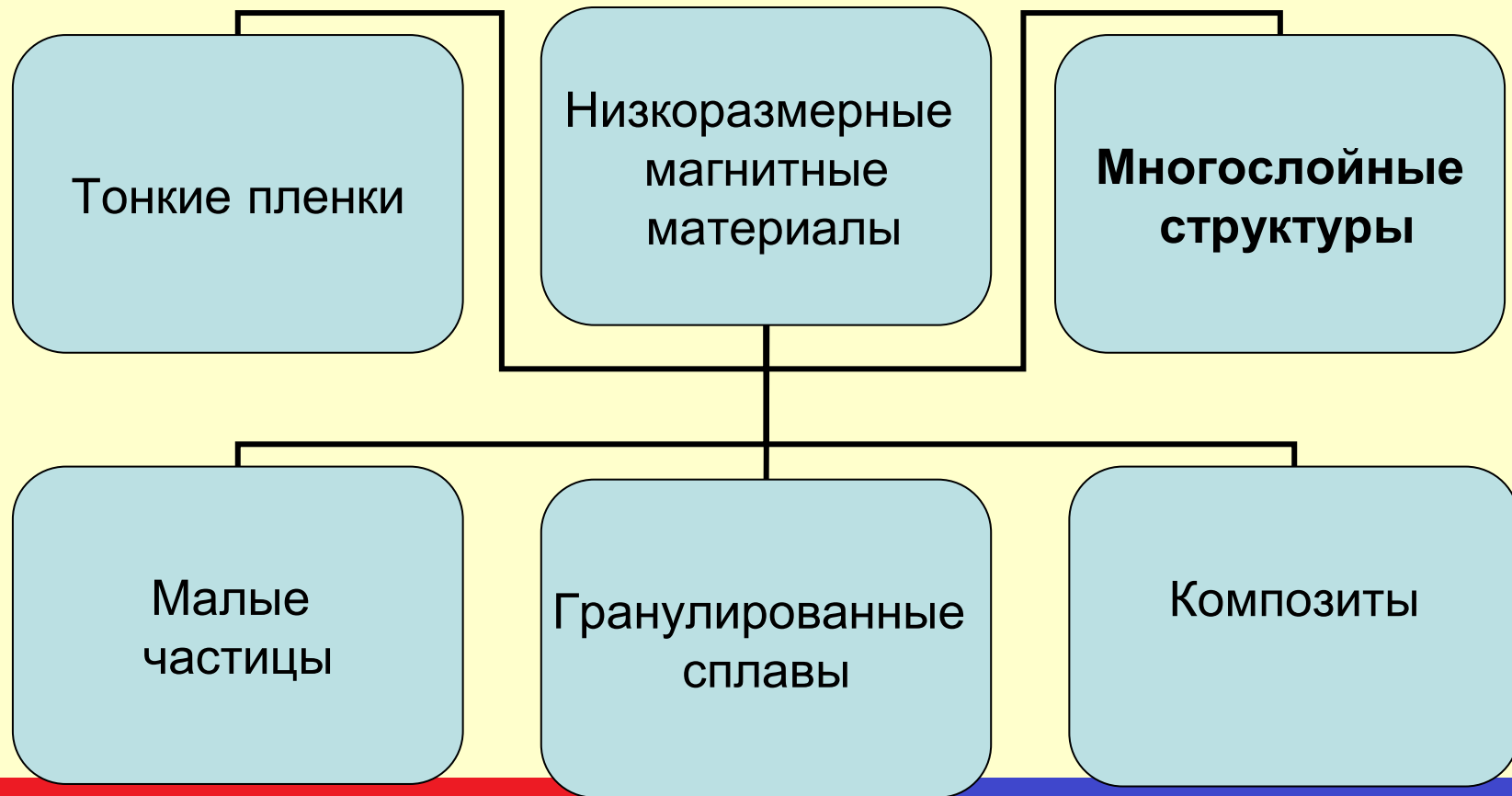
$$Z = R_{DC} \frac{kaJ_0(ka)}{2J_1(ka)}$$



$$k = \frac{(1+i)}{\delta}$$
$$\delta = c \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 \sigma \mu_\phi f}}$$

Магнитные датчики для микроэлектроники.





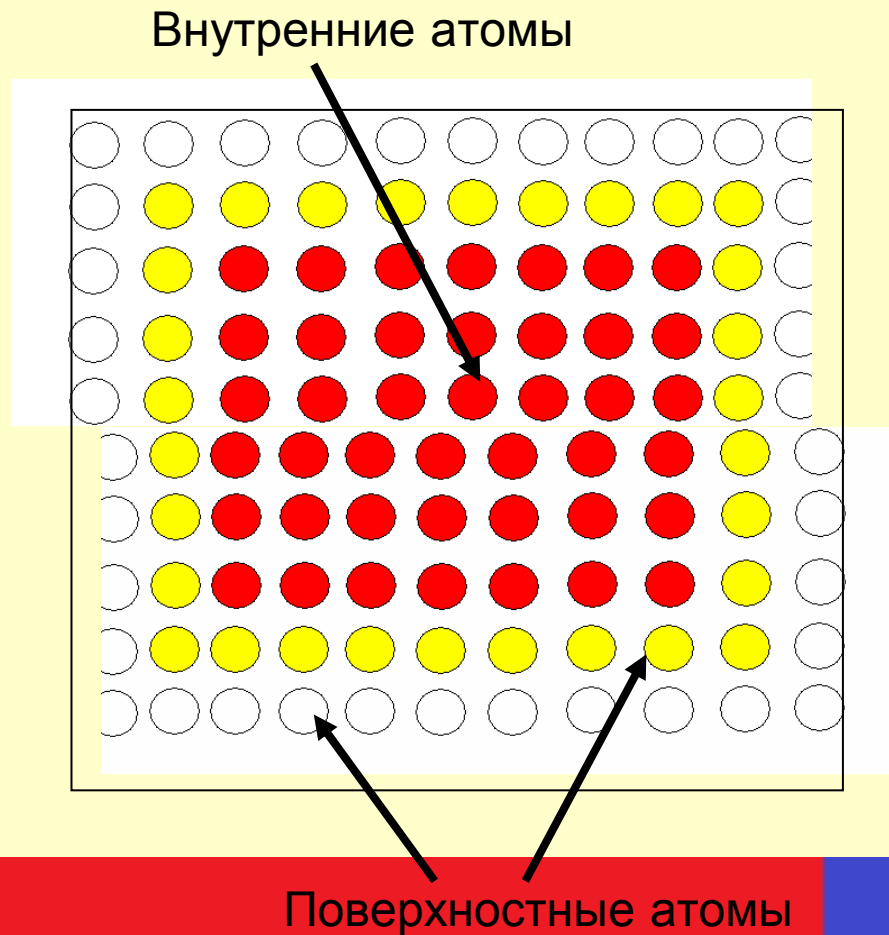


Классификация

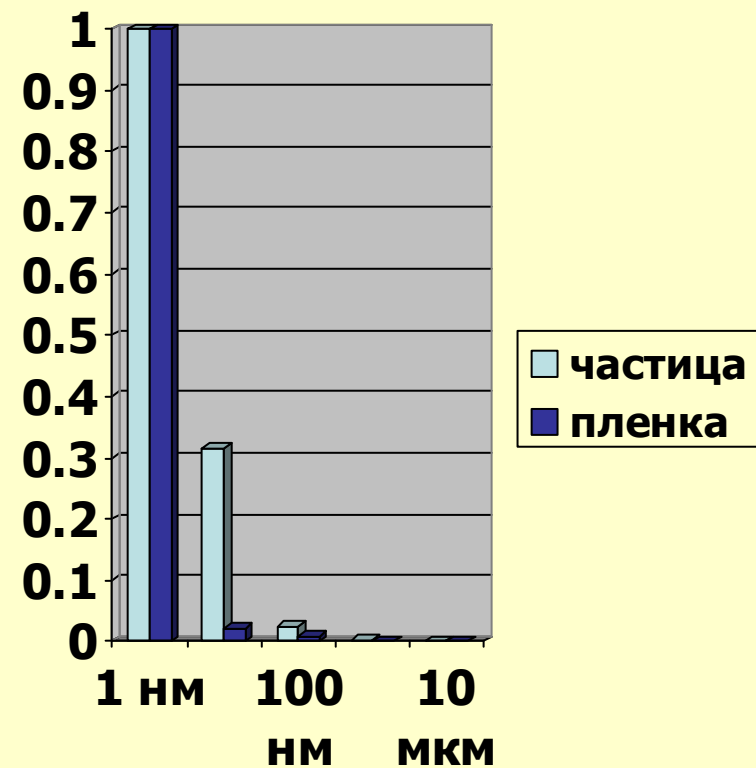
- Сплошной материал (>10 мкм)
- Многодоменные малые частицы (0.02-10 мкм)
- Однодоменные малые частицы (10-1000 нм)
- Суперпарамагнитные частицы (1-100 нм)
- Кластеры (<1 нм)
- Свойства системы
- Межчастичные взаимодействия
- Свойства одиночных частиц
- Влияние окружения частиц



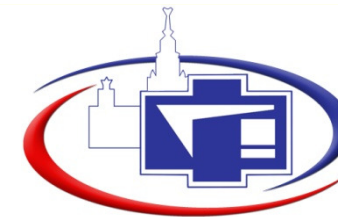
Низкоразмерные системы



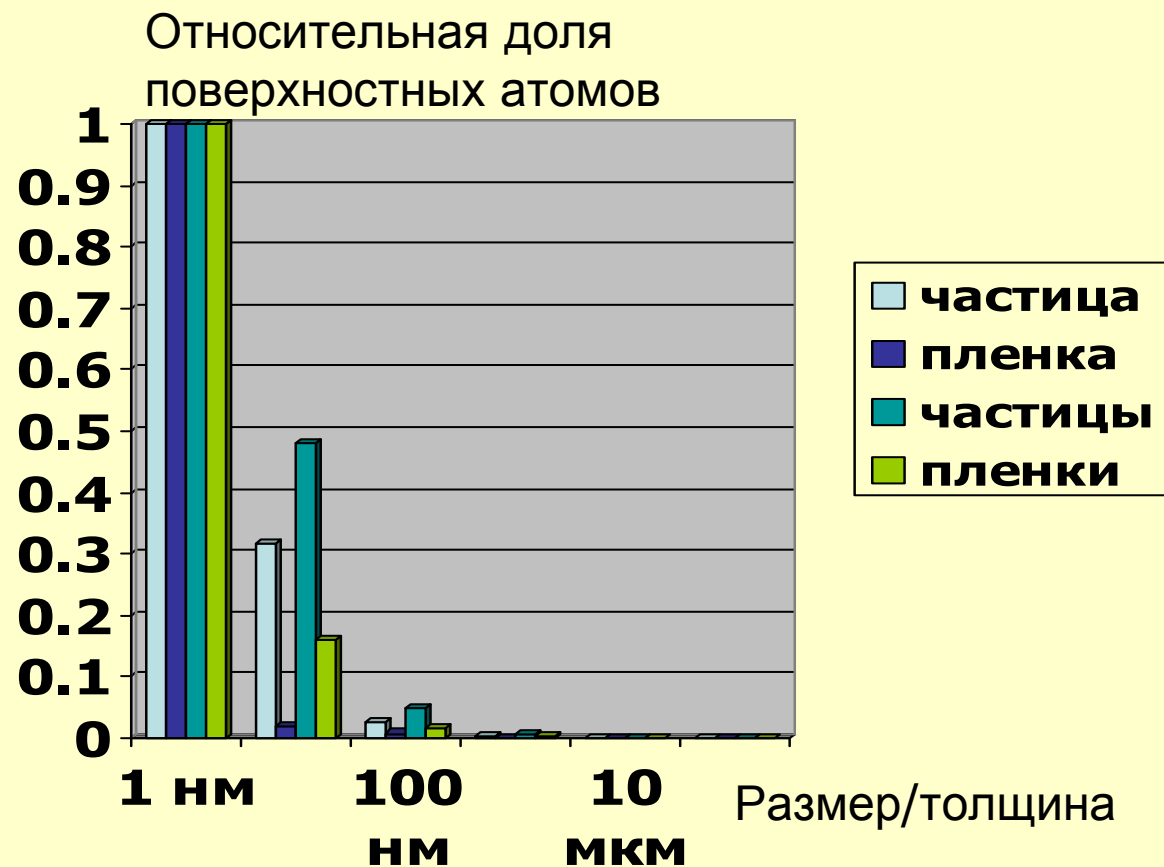
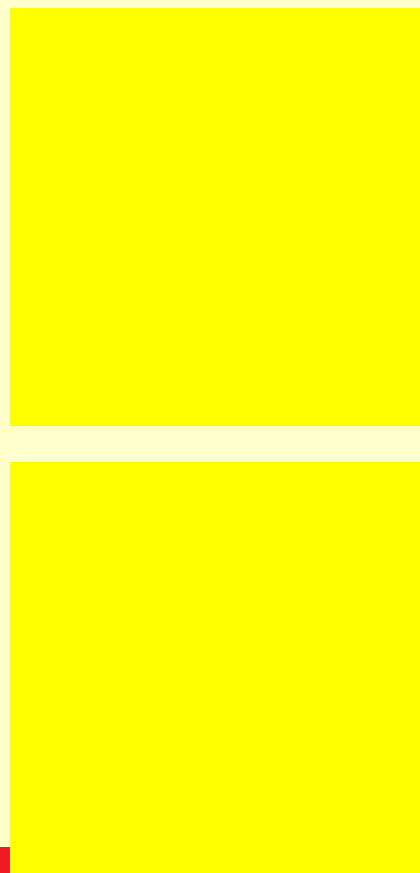
Относительная доля
поверхностных атомов



Размер/толщина



Низкоразмерные системы

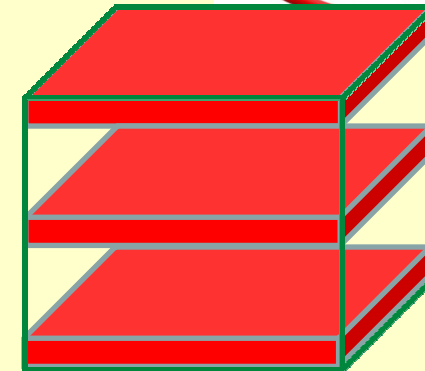
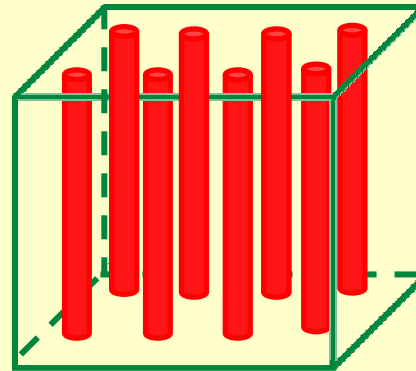
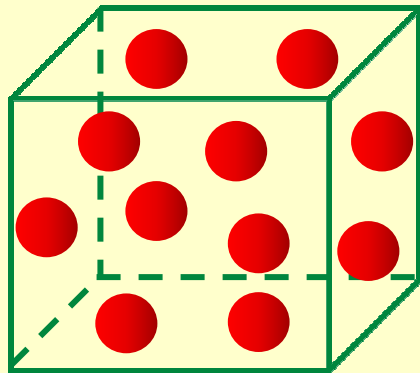
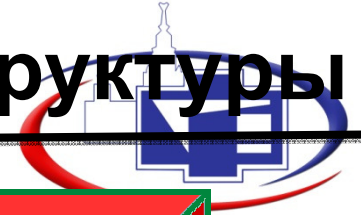




Новые магнитные материалы

Композитные материалы

Композитные структуры



Магнитные материалы:

- ❑ Металлы: Ni, Co, Fe;
- ❑ Сплавы на основе железа: FeNi, FeCo, FeGa;
- ❑ Аморфные магнитные сплавы: FeNiSiB, FeNiCB;
- ❑ Ферриты: NiZnFe₃O₄, NiCoFe₃O₄;
- ❑ Терфенол TbDyFe;
- ❑ Материалы с памятью формы.

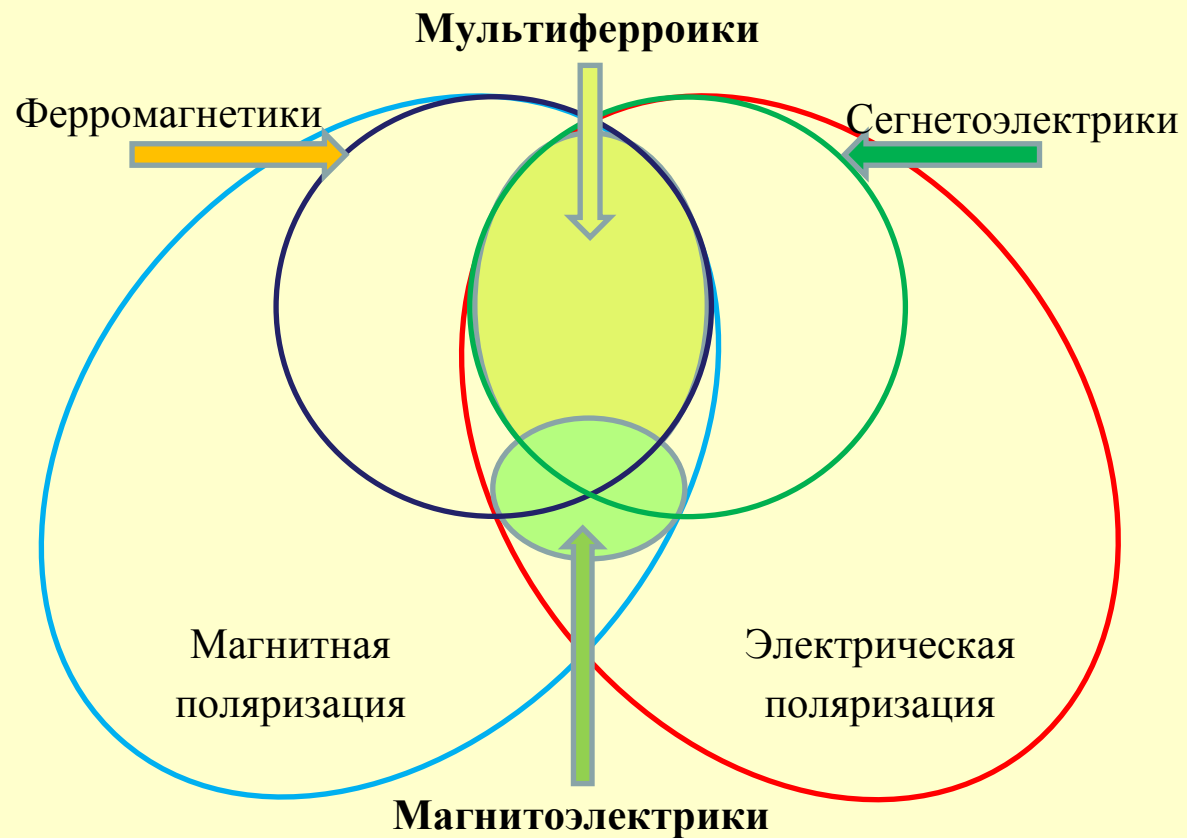
$$\alpha_{ME} \sim Q \frac{dq}{\varepsilon}$$

Где d – пьезомодуль,
 q – пьезомагнитный коэффициент,
 ε – диэлектрическая проницаемость,
 Q – добротность акустического резонанса.

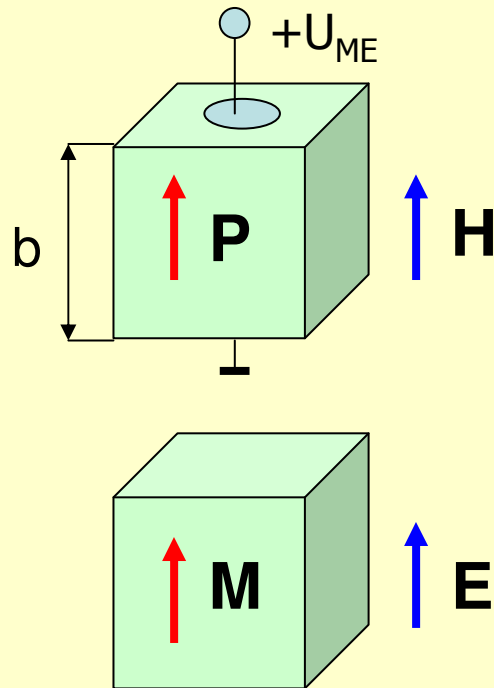
Сегнетоэлектрические материалы:

- ❑ Цирконат-титанат свинца (PZT);
- ❑ Магниониобат-титанат свинца (PMN-PT);
- ❑ Нитрид Алюминия AlN.

Что такое магнитоэлектрики?



Магнитоэлектрический эффект



Прямой МЭ эффект – возникновение электрической поляризации вещества под действием внешнего магнитного поля.

$$\alpha_E = \frac{E}{H} = \frac{U}{bH}, \text{ мВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Э}^{-1}$$

Обратный МЭ эффект – изменение намагниченности образца под действием внешнего электрического поля.

$$\alpha_B = \frac{H}{E} = \frac{HB}{U}, \text{ Гс} \cdot \text{см} \cdot \text{В}^{-1}$$

Впервые МЭ эффект был предсказан Р. Curie в 1894, объяснение дано Л. Ландау и Е. Лифшицем в 1960, впервые наблюдался Д. Астровым в 1960 в кристаллах Cr_2O_3

МЭ эффект в кристаллах и композитах



First observed by D. Astrov, Sov. Phys. JETP, 1960

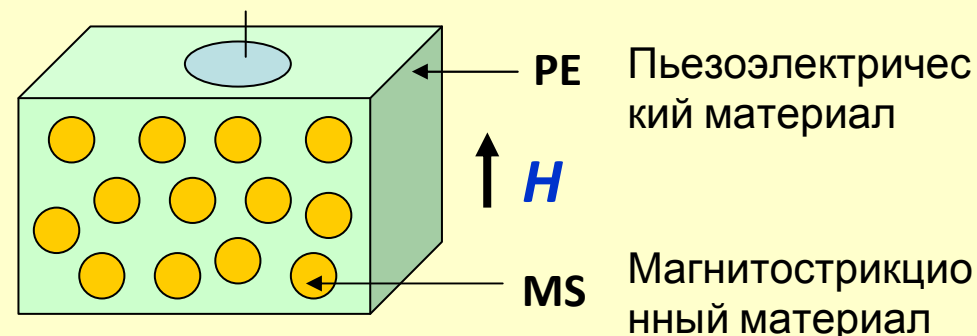
Состав	Магнитный порядок	T_c или T_N
Cr_2O_3	AF	$T_c = 307$ K
$LiFePO_4$	AF	$T_c = 50$ K
$TbCoO_3$	AF	$T_c = 3.3$ K
$Fe_xGa_{2-x}O_3$	FM	$T_c = 305$ K
.....		
$BiFeO_3$	AF	$T_N = 380$ K

Недостатки МЭ эффекта в твердых телах:

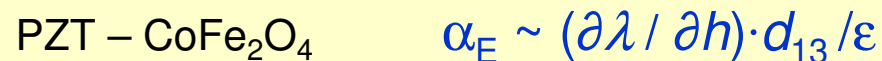
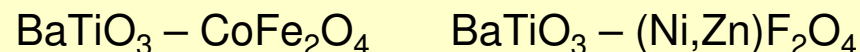
- Низкие рабочие температуры,
- Малая величина эффекта,
- Высокие магнитные поля

$$\alpha_E \sim 1 \dots 20 \text{ mV/cm} \cdot \text{Oe}$$

J. Van Suchtelen, 1972, Philips. Res. Rep.



Магнитоэлектрический эффект заключается в возникновении электрической поляризации. вследствие пьезоэффекта, вызванного механической деформацией, возникшей из-за магнитострикции.



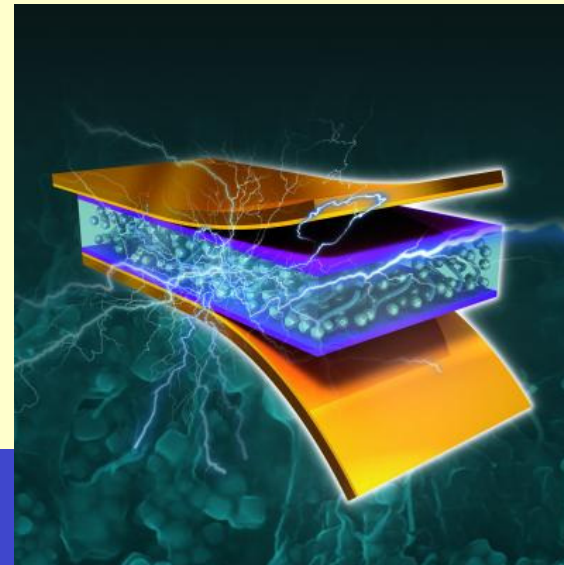
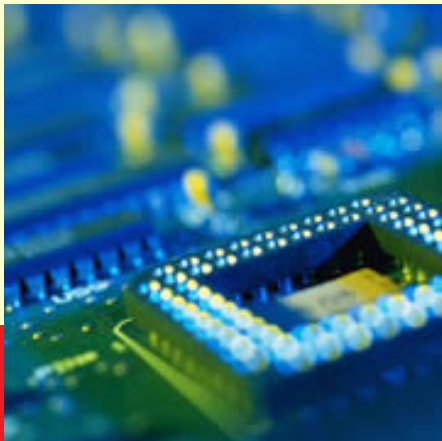
$$\alpha_E \sim 1 \dots 120 \text{ mV/cm} \cdot \text{Oe}$$

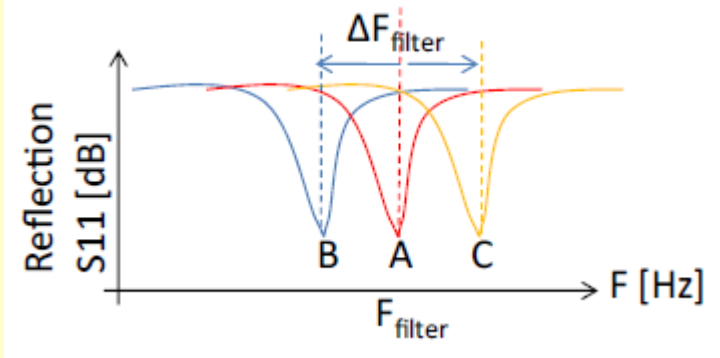
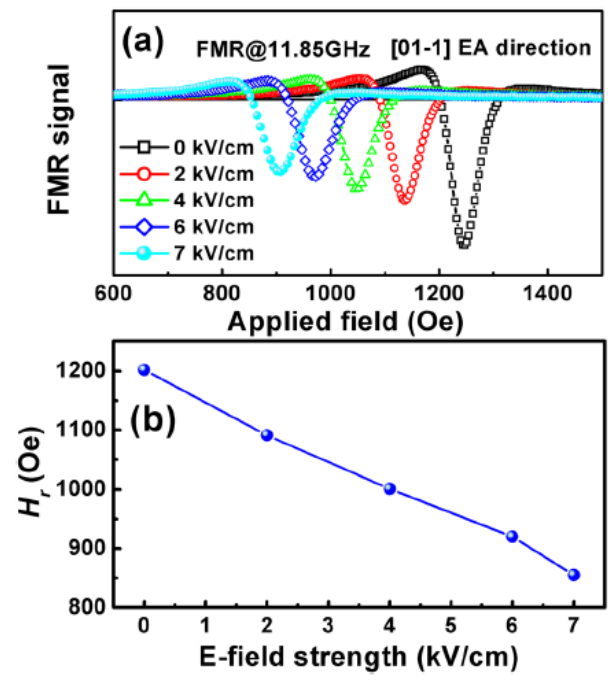
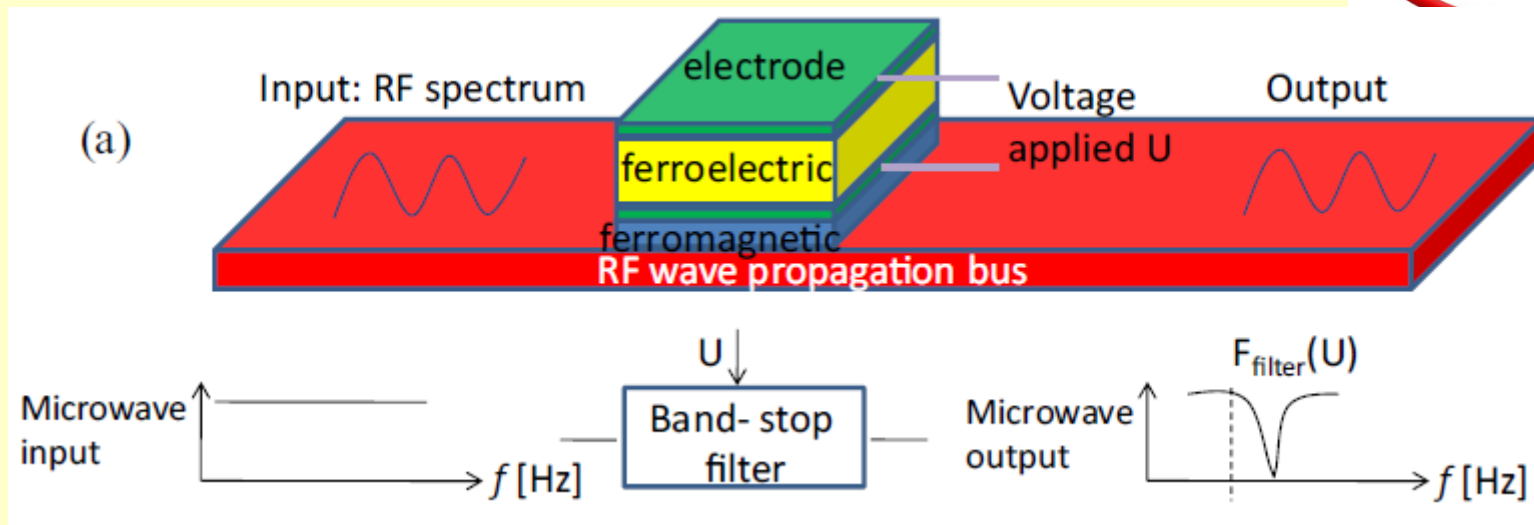
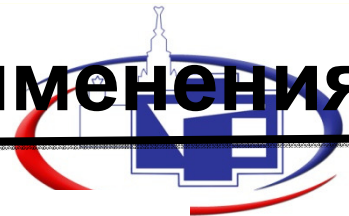
МЭ коэффициент на порядок меньше рассчитанного значения

Применения



- Датчики магнитных полей
- Датчики положения
- Микромоторы
- Умножители частот
- Фазовращатели
- Метаматериалы
- Антенны
- СВЧ резонаторы
- Автономные источники энергии
- Линии задержки
- СВЧ фильтры





$$f_{FMR} = \gamma \sqrt{(H_r + H_K + H_{eff})(H_r + H_K + H_{eff} + 4\pi M_S)}$$

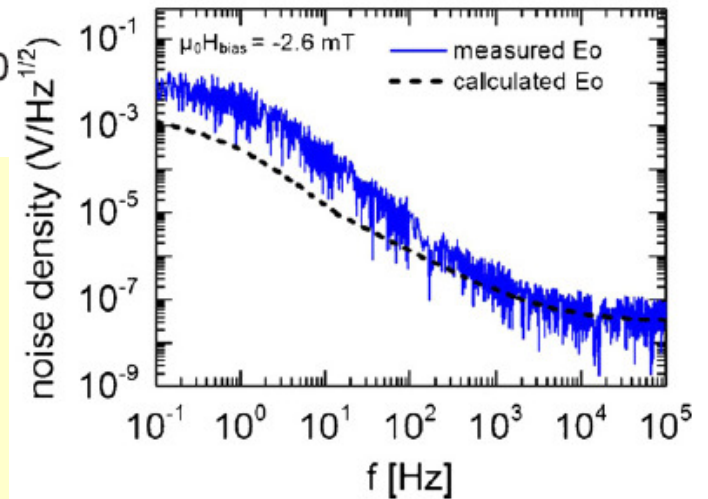
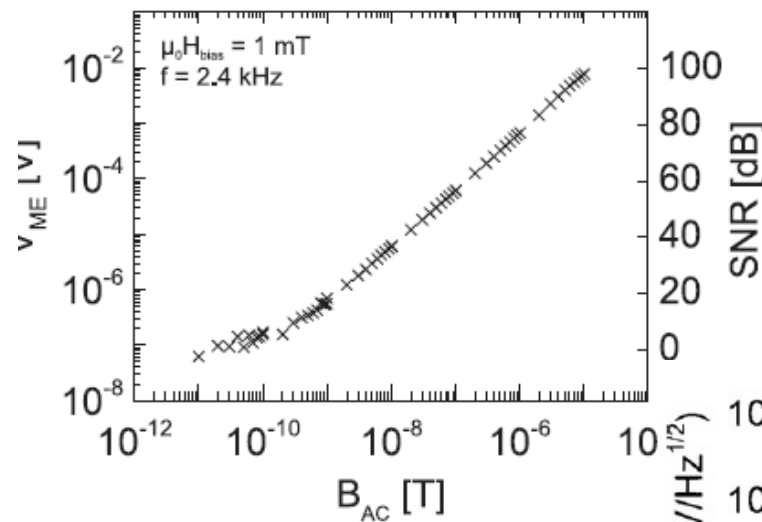
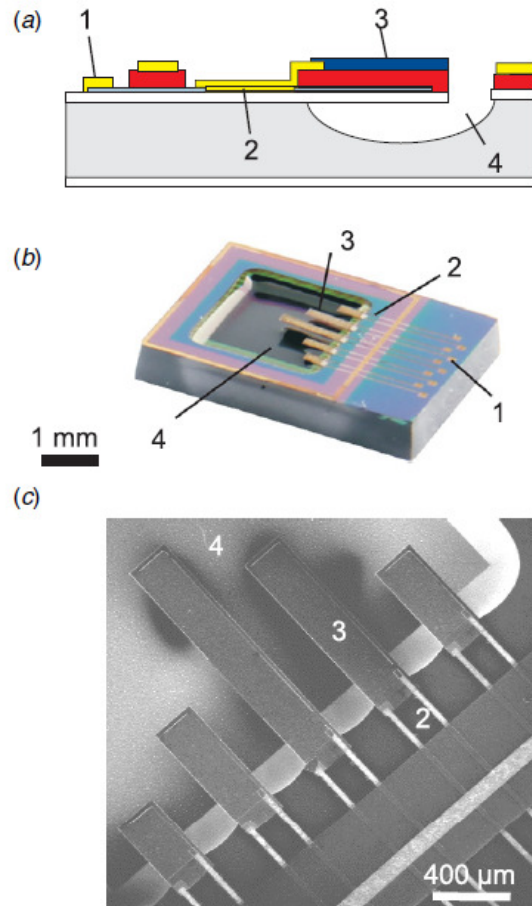


Fig. 8. Frequency dependence of noise voltage density E_0 .

Minimum detectable field of different micro vector-magnetometers.

Reference	Principle	Resolution [nT]	Dimension ^a [μm]
This work	ME	0.03	$\sim 900 \times 200$
Kádár et al. [24]	Lorentz-Force	1	2.800×1.400
Haned and Missous [25]	Hall-Sensor	100	210×210
Bertoldi et al. [26]	AMR	20	$\sim 1000 \times 1000$
Wang et al. [27]	GMR	30	1400×1400
Liakopoulos and Ahn [28]	Micro-Fluxgate	60	5000×2500
Yabukami et al. [29]	GMI	0.088	5000×50

^a Length \times width of the sensor.

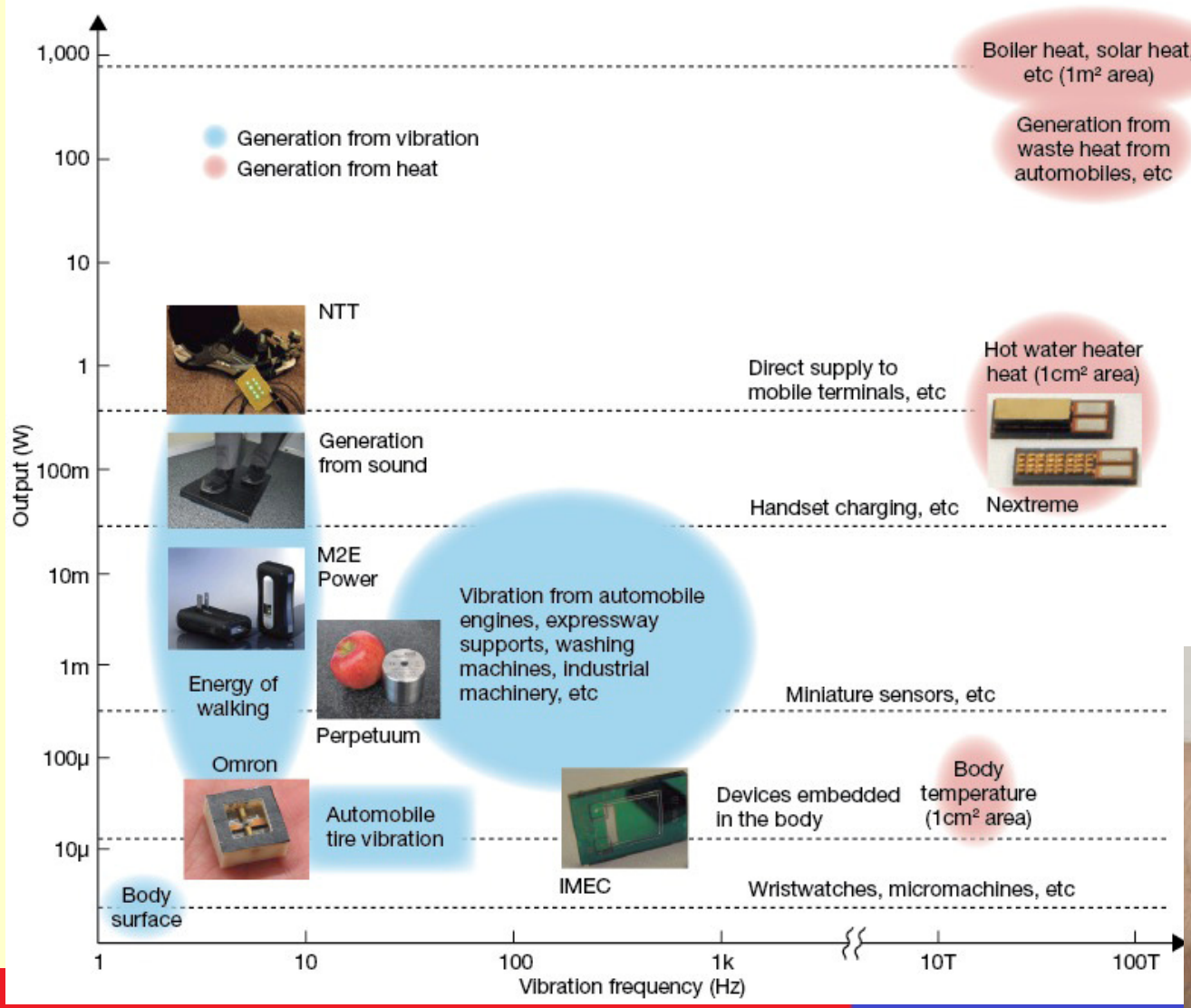
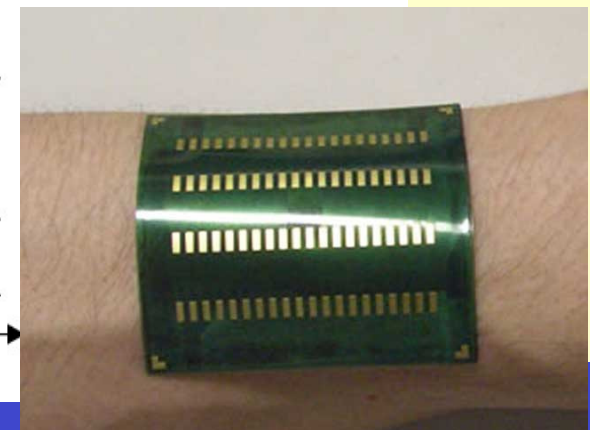
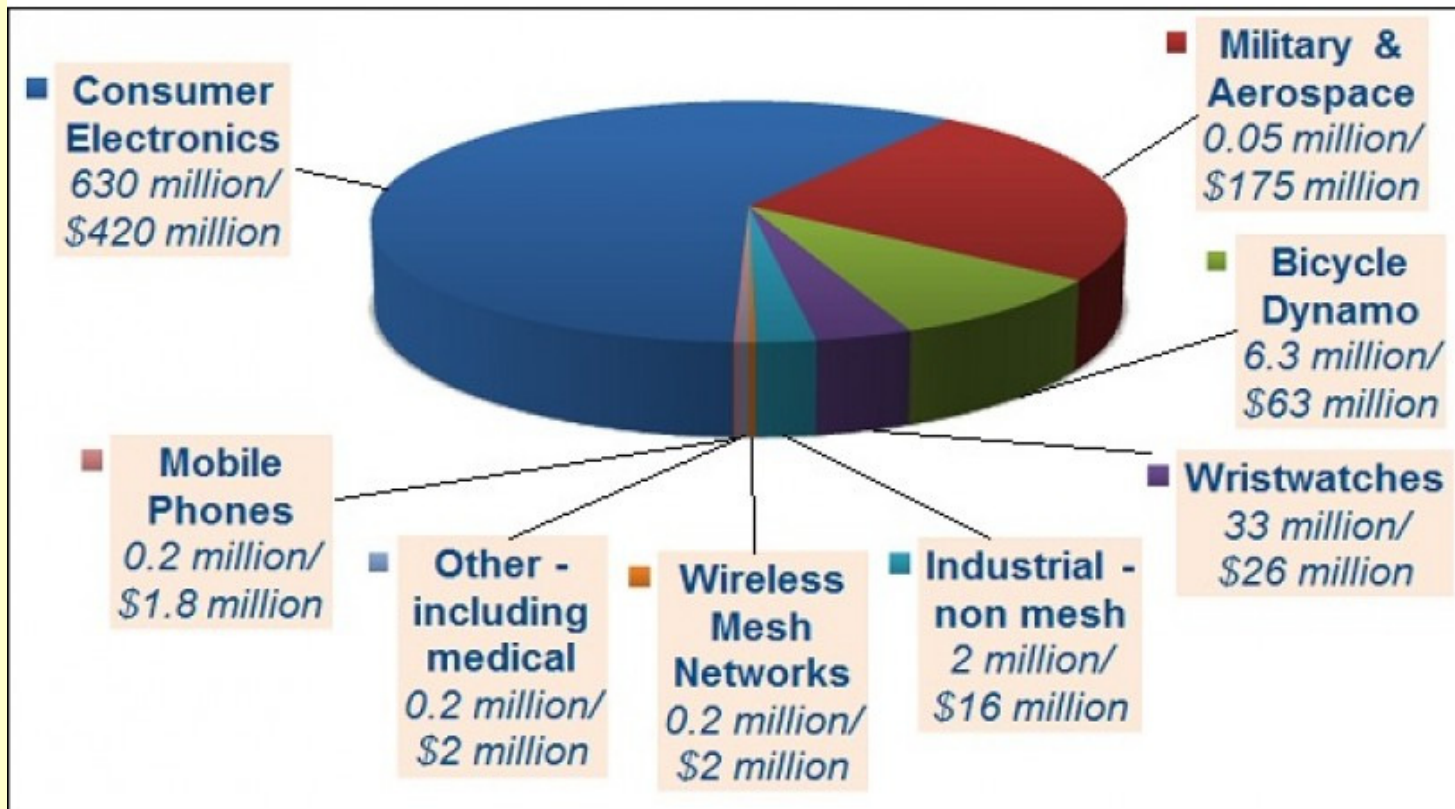
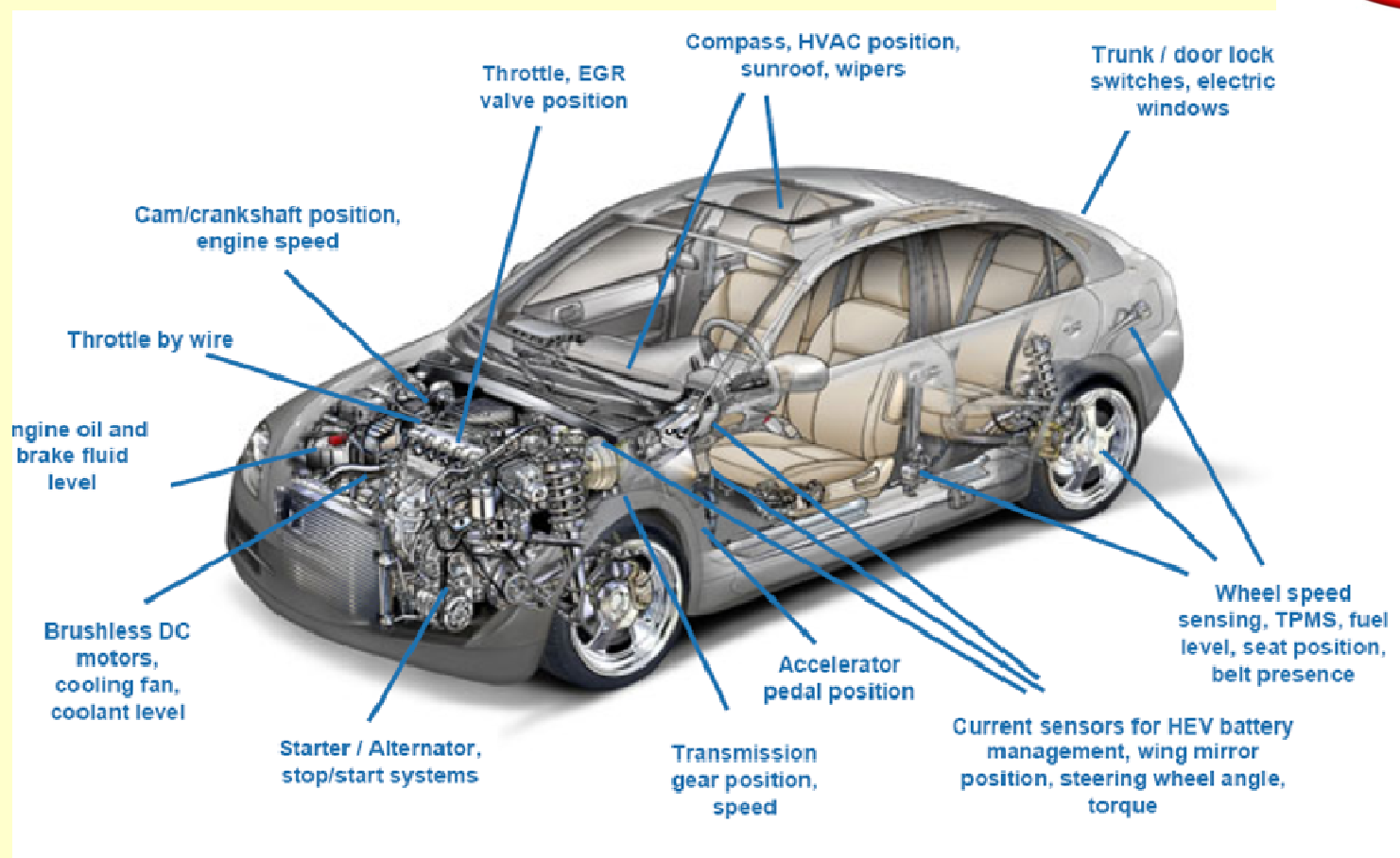
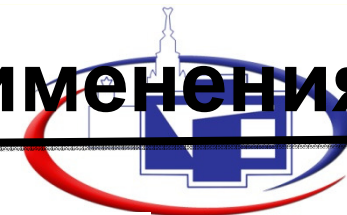


Fig 1 Wide Range of Outputs from 10 μ W to 1kW Heat as a type of vibration in the broad definition. Diagram shows outputs and vibration frequencies possible with existing technology for generation from vibration and heat. Generation from heat is expected to achieve 5W per cm² of area, or 1kW per m². Systems using turbines are the most effective in generation from vibration. There is a positive correlation between generating device size and output.

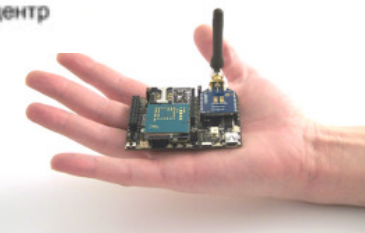
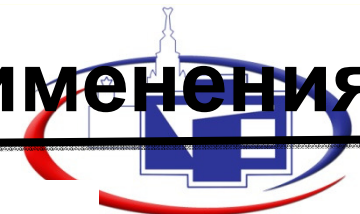






Сенсорные сети

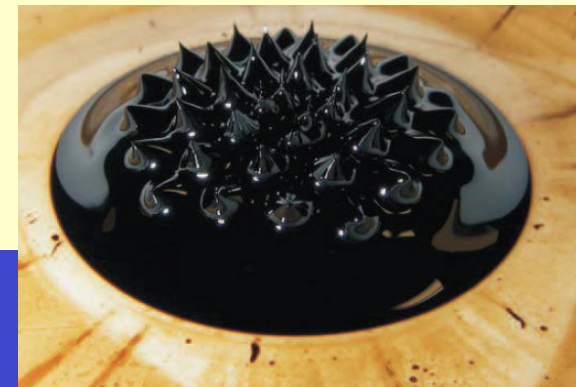
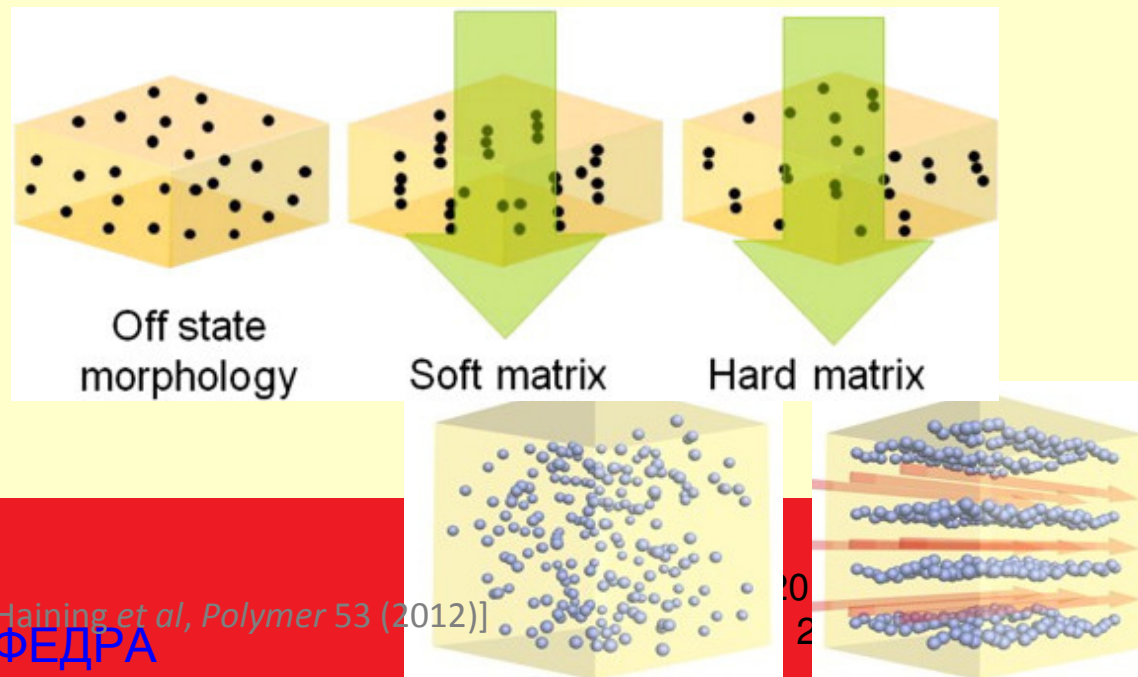
Применения



Магнитореологические материалы

Функциональные материалы, состоящие из магнитных частиц, равномерно распределенных в жидкости, геле или эластомере.

Механические и реологические свойства таких материалов изменяются при взаимодействии магнитных частиц с внешним магнитным полем.



[An Haining et al, Polymer 53 (2012)]

КАФЕДРА

МАГНЕТИЗМА

Магнитные жидкости

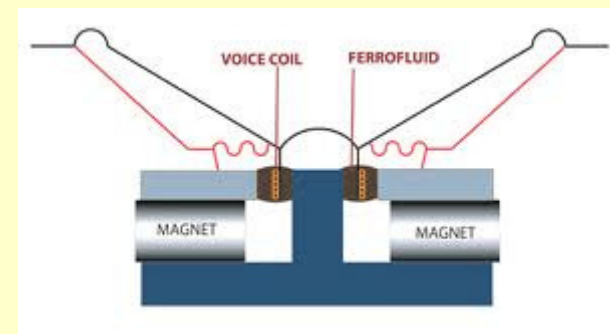


- Электронные приборы
- Точное машиностроение
- Материаловедение
- Оптика
- Искусство
- Медицина
- Тепловые конвертеры

Магнитные жидкости



- Электронные приборы
- Точное машиностроение
- Материаловедение
- Оптика
- Искусство
- Медицина

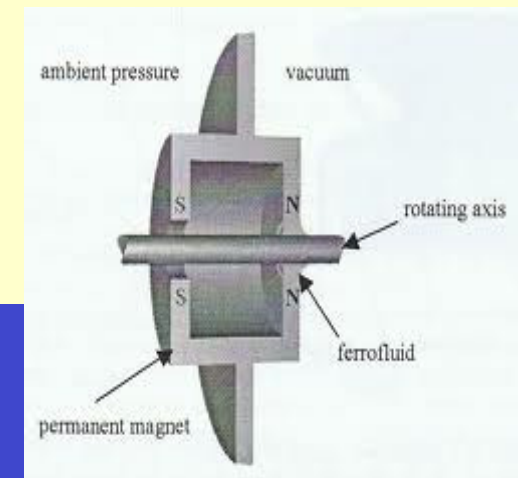
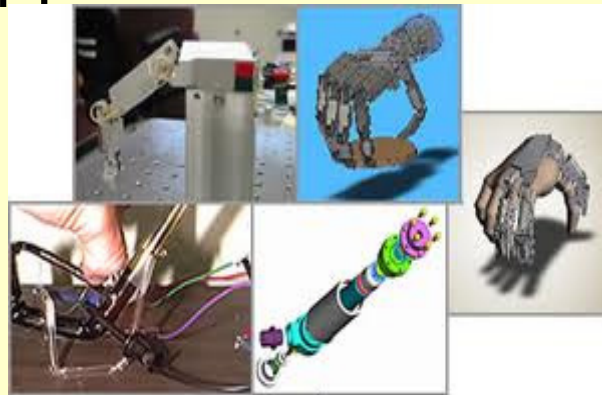


- Тепловые конвертеры

Магнитные жидкости

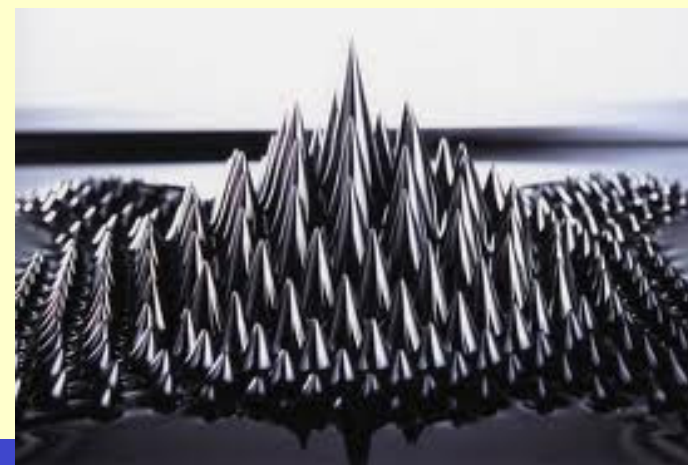
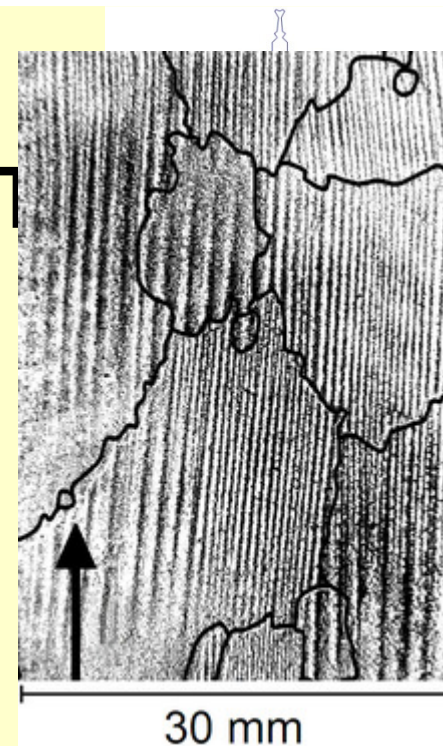


- Электронные приборы
- **Точное машиностроение**
- Материаловедение
- Оптика
- Искусство
- Медицина
- Тепловые конвертеры



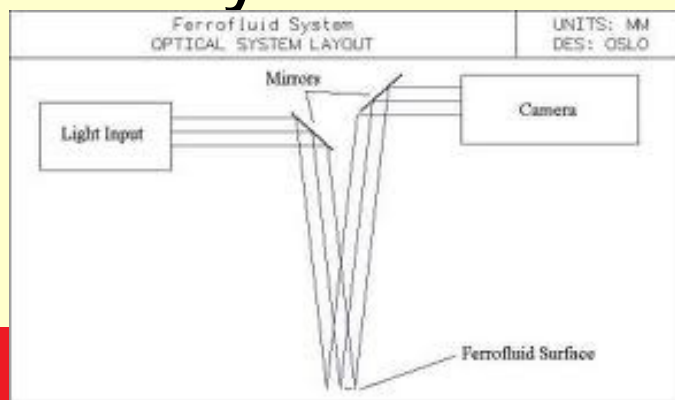
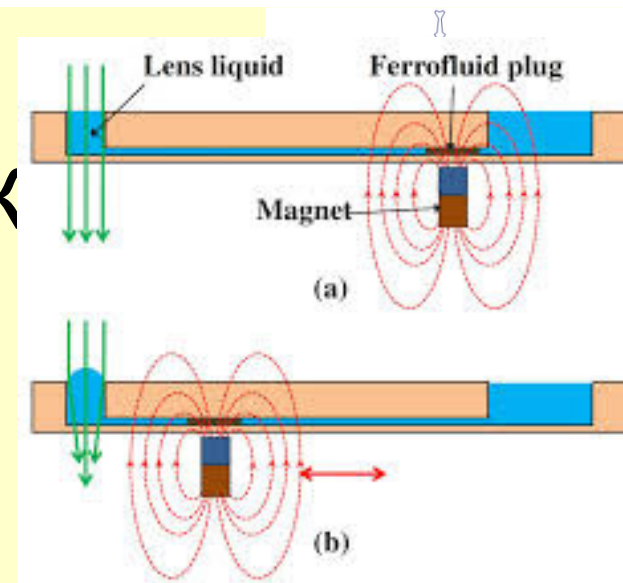
Магнитные жидкости

- Электронные приборы
- Точное машиностроение
- **Материаловедение**
- Оптика
- Ис
- Ме
- Те

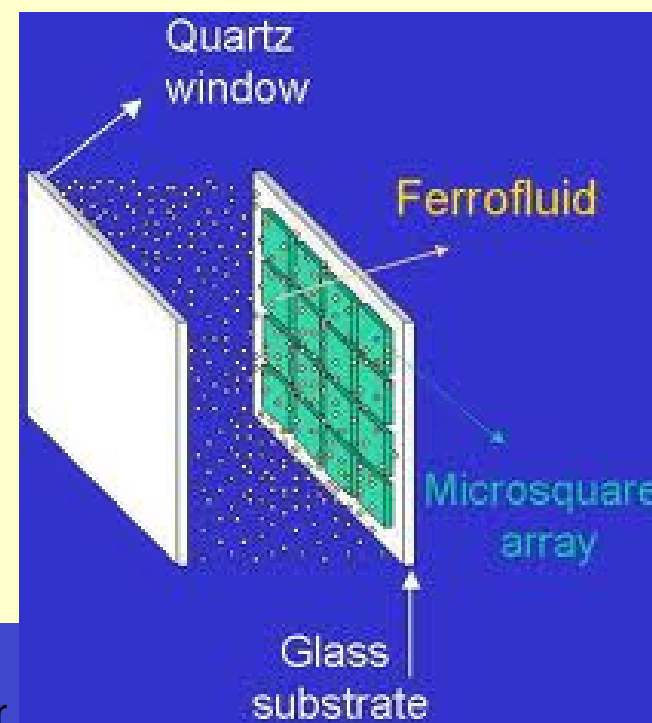


Магнитные жидкости

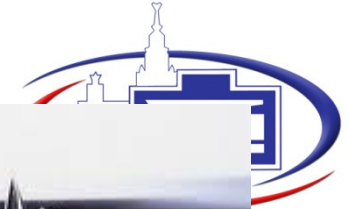
- Электронные приборы
- Точное машиностроение
- Материаловедение
- **Оптика**
- Искусство



зеркала

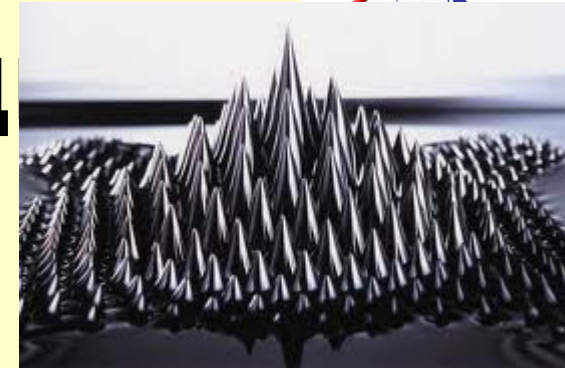


EastMag, 15 – 21 September
2013, Valdivia, Chile



Магнитные жид

- Электронные приборы
- Точное машиностроение
- Материаловедение
- Оптика
- **Искусство**



рте

g, 15 – 21 September
Valadivistok Russia

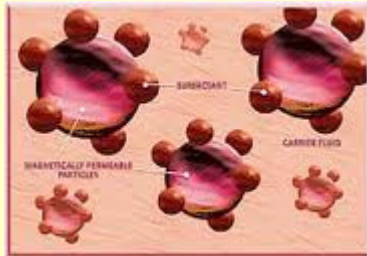
52

МАГНЕТИЗМА

КАС



Магнитные жидкости



ронные прибо
...ные машиностр
енис



- Медицина
- Тепловые конвертеры

Магнитореологические эластомеры

- Композитные функциональные материалы, обладающие магнитными свойствами
- Механические и вязкоупругие свойства легко изменяются в магнитном поле
- Деформация в магнитном поле может достигать 100%
- Управляемые потери



[Liu T.Y. et al, *Langmuir*, 22 (2006)]

[Chertovich et al, *Macromolec. Mater. And Eng.*, 395 (2010)]

[Photo - www.isc.fraunhofer.de]

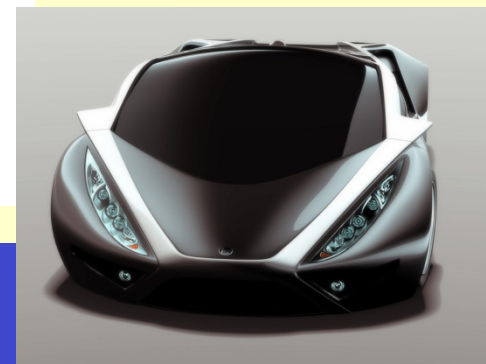
Магнитореологические эластомеры



- Домашнее хозяйство



- Техника



EastMag, 15 – 21 September
2013, Valdivistok Russia