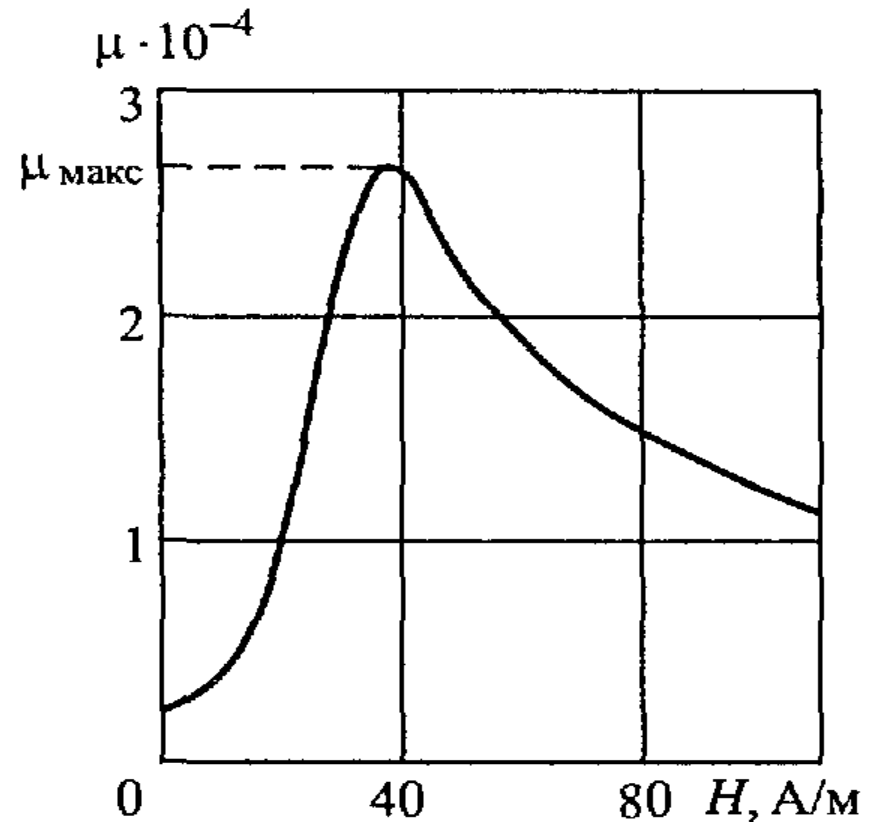


Лекция 16.

- Ферромагнетики. Спонтанная намагниченность и температура Кюри. Доменная структура. Гистерезис намагничивания, кривая Столетова. Остаточная индукция и коэрцитивная сила. Температурная зависимость намагниченности.

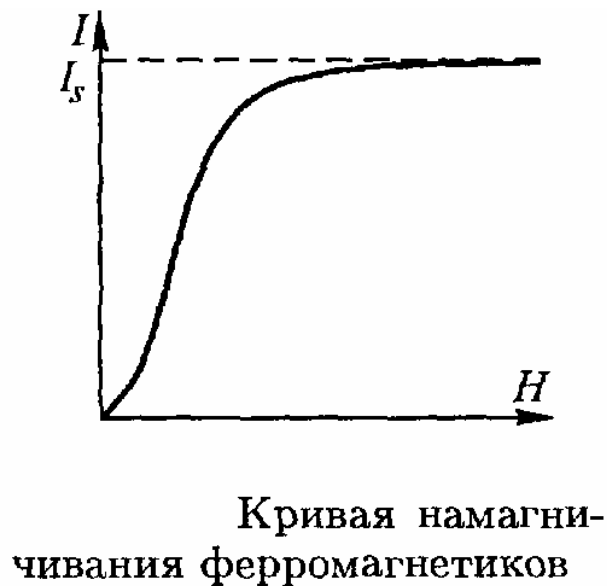
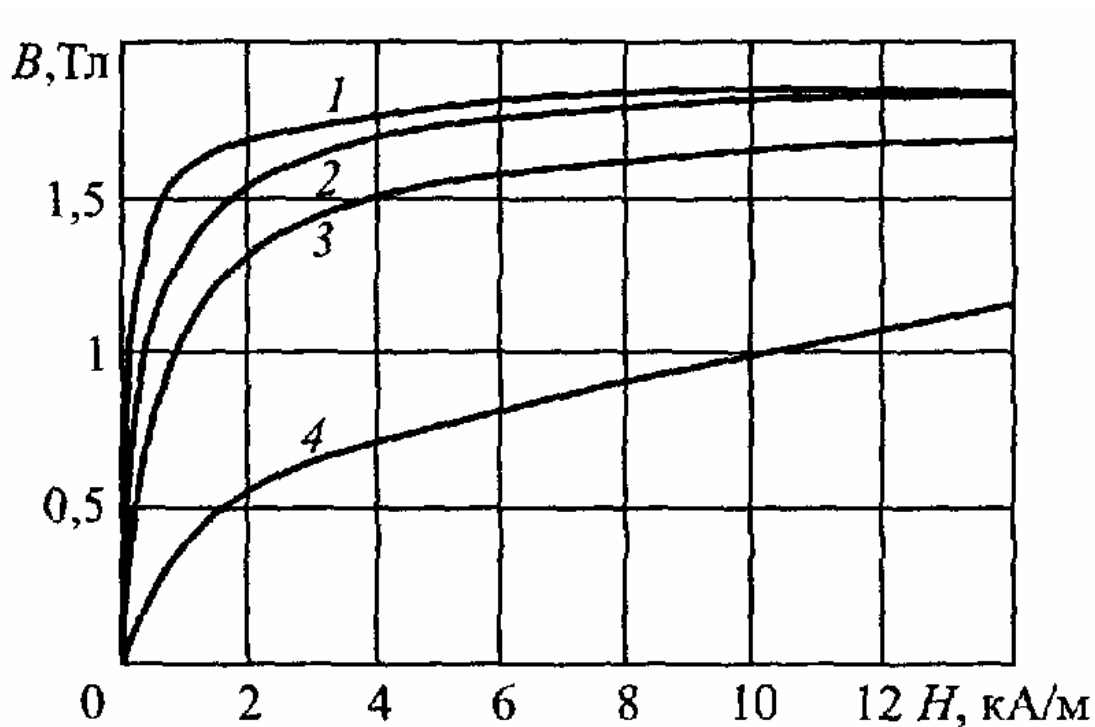
Ферромагнетики.

- Ферромагнетики – это сильномагнитные магнетики, относительная магнитная проницаемость которых может достигать десятков тысяч единиц. Кроме этого, ферромагнетики обладают рядом других отличительных особенностей по сравнению с диа- и парамагнетиками.



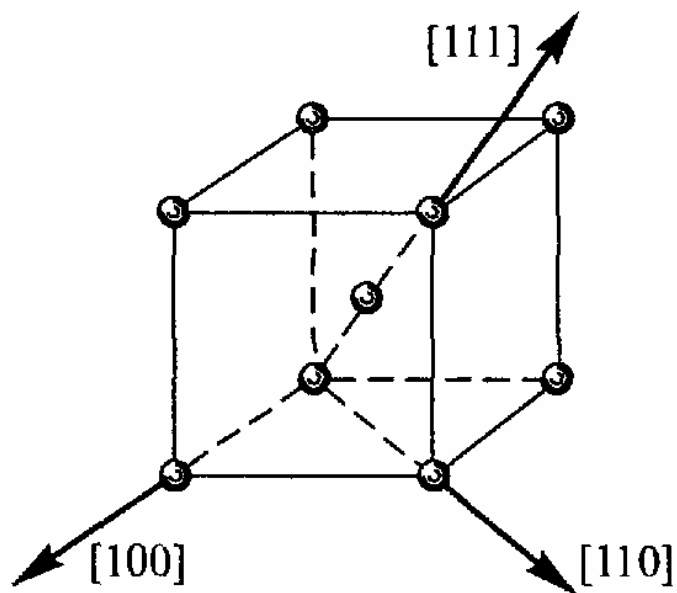
Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля. На рисунке приведена такая зависимость для чистого железа (**кривая Столетова**).

Кривая намагничивания

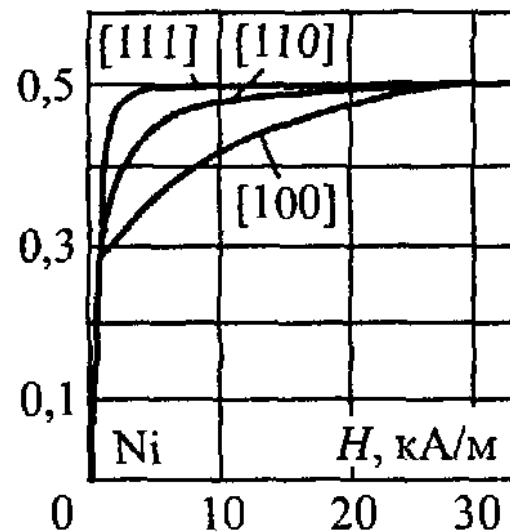
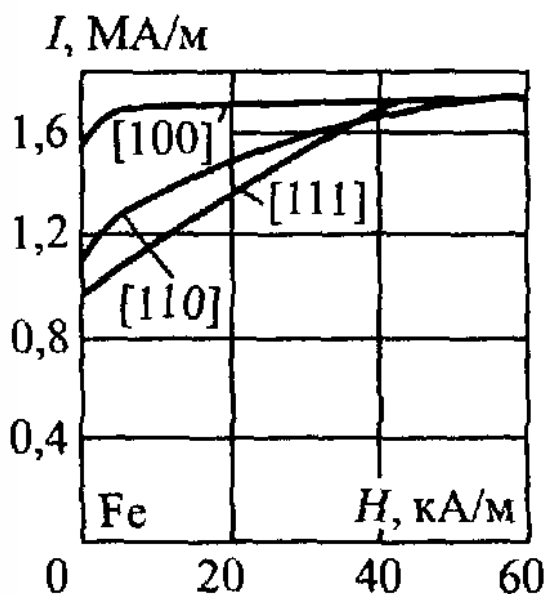


Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля: 1 — электролитическое железо, 2 — малоуглеродистое железо, 3 — литая сталь, 4 — чугун

Анизотропия намагничивания.



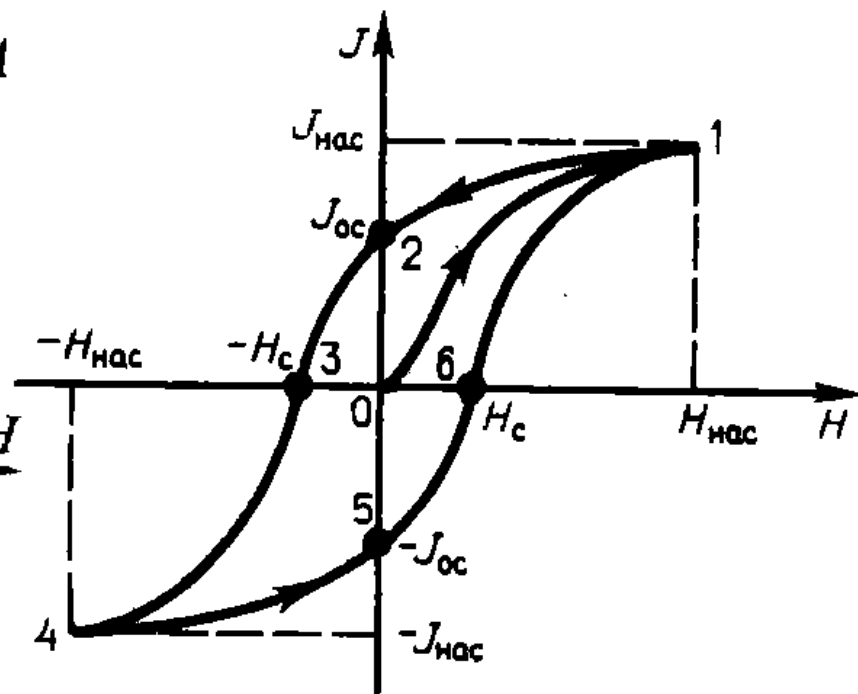
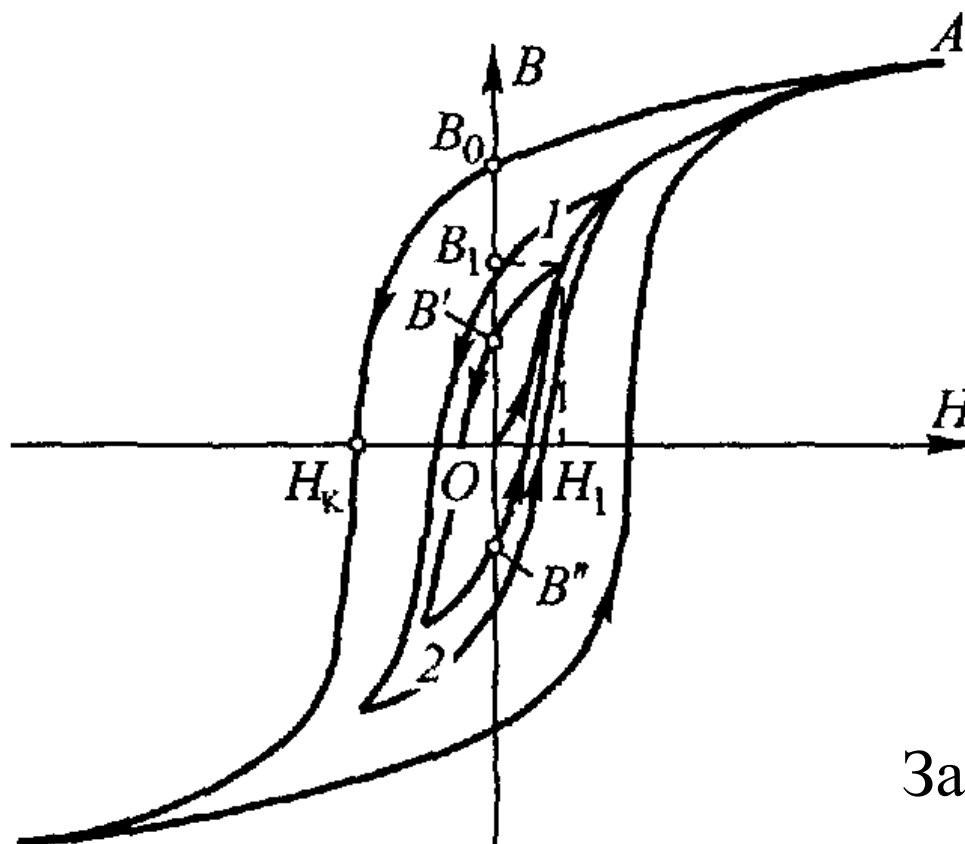
Элементарная кристаллическая ячейка железа и ее основные кристаллографические направления: [100] — легкого, [111] — трудного намагничивания



Кривые намагничивания Fe и Ni по различным направлениям монокристаллических образцов.

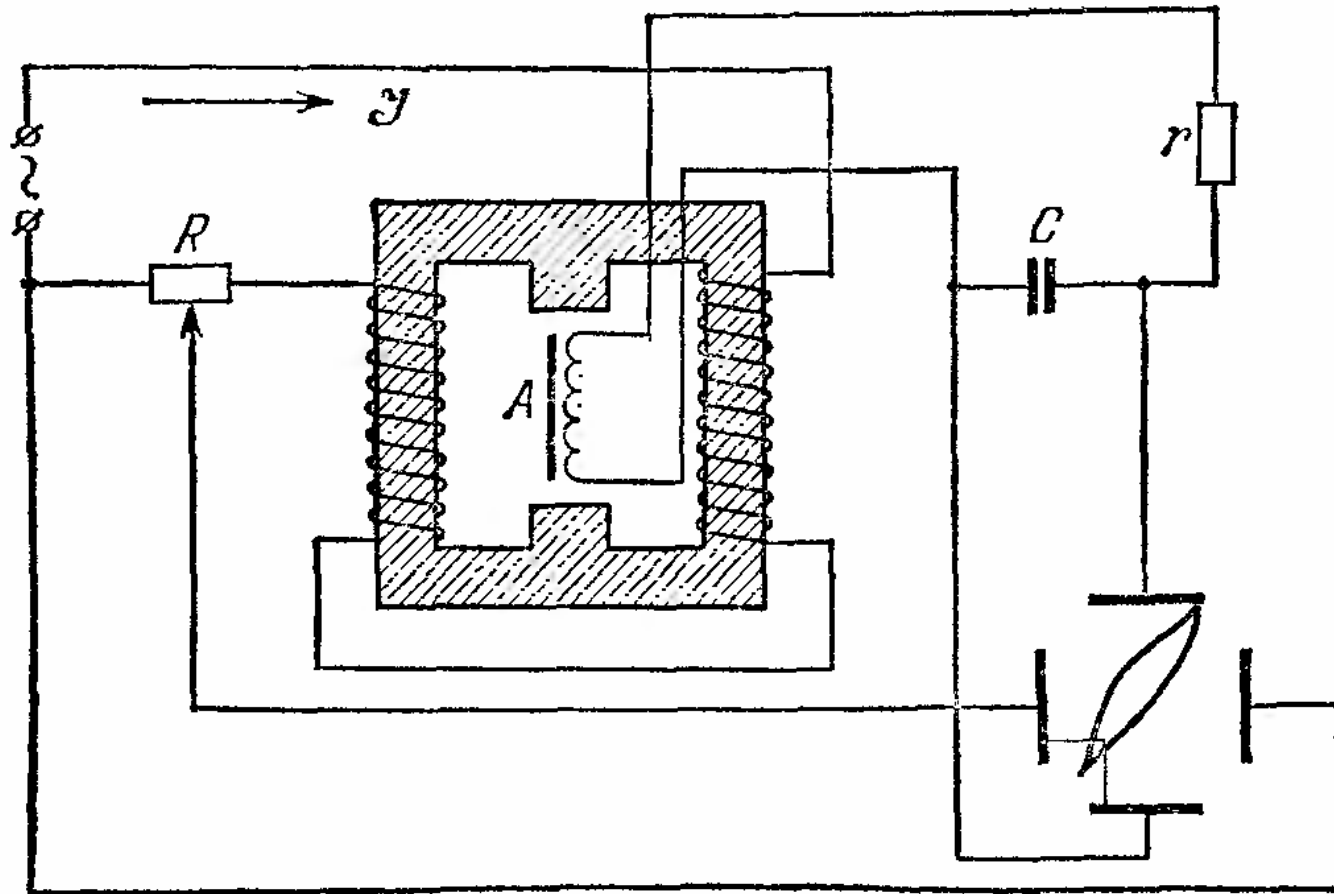
Гистерезис намагничивания.

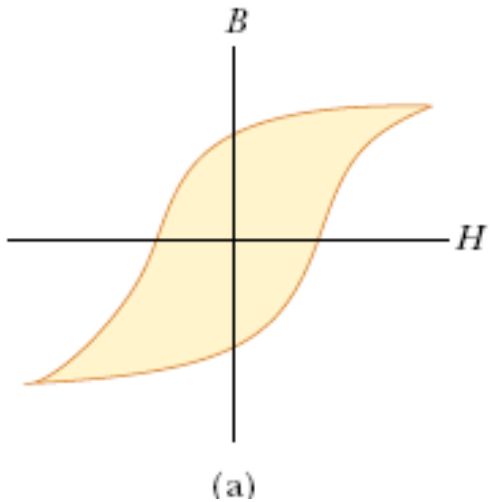
Остаточная индукция и коэрцитивная сила.



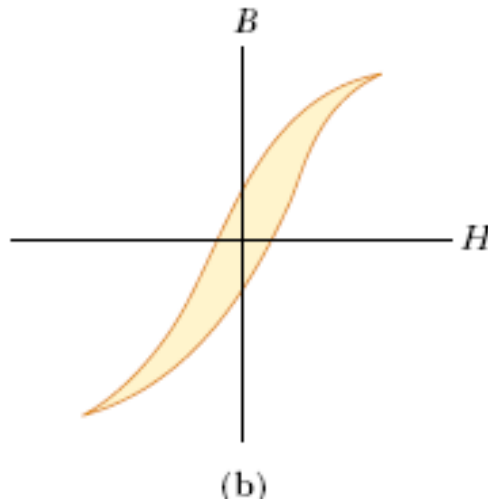
Зависимость $B(H)$ или $I(H)$ неоднозначна и определяется предисторией намагничивания.

Схема установки для наблюдения петли гистерезиса.

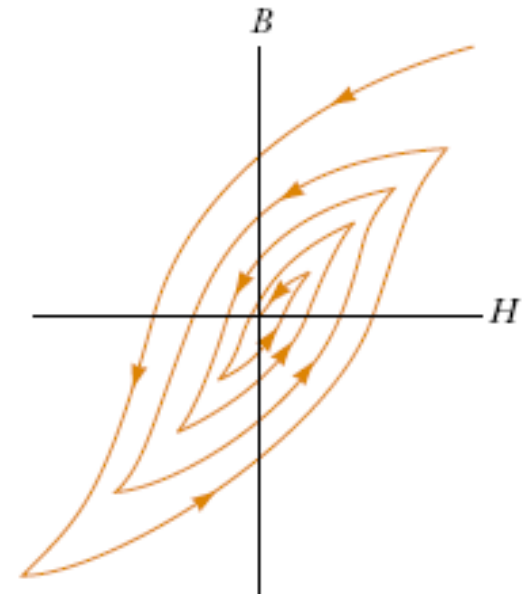




Если $H_K \gg 1 \text{ A/cm}$, жесткий ферромагнетик

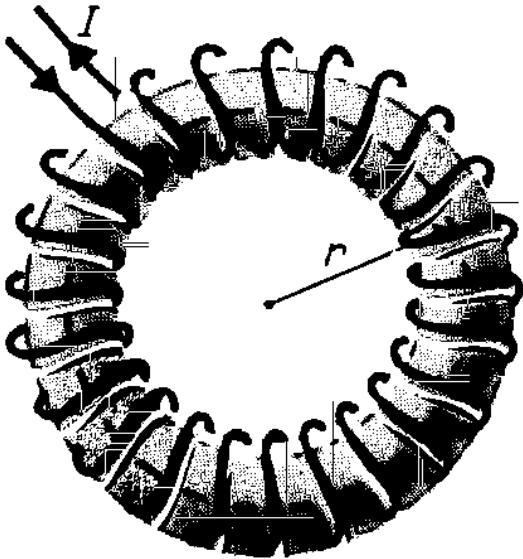


Если $H_K < 1 \text{ A/cm}$, мягкий ферромагнетик



Способ
размагничивания

Работа при намагничивании ферромагнетика.

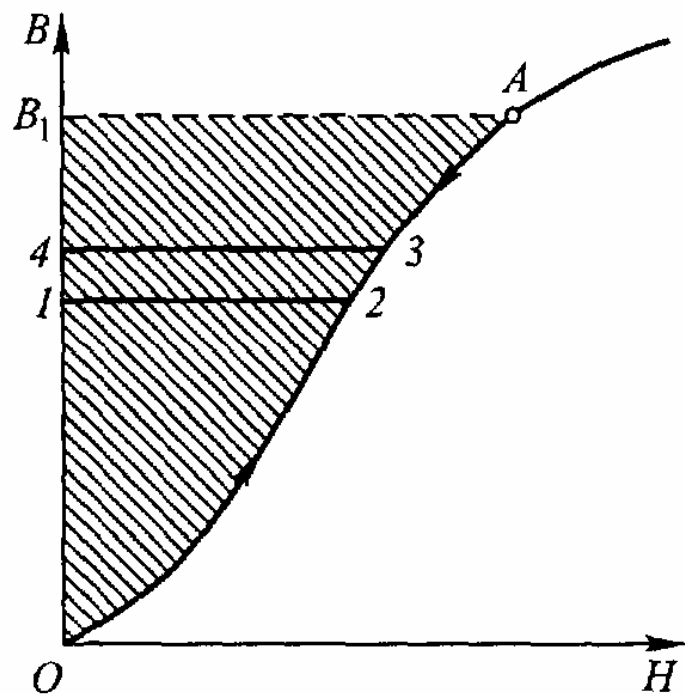


Пусть тороид заполнен ферромагнетиком. При увеличении тока в обмотке на dI возникает ЭДС самоиндукции, против которой ток совершает работу $dA = -Idt\mathcal{E}^{уно} = Id\Phi$, где $\Phi = BNS$, N - число витков. По теореме о циркуляции вектор \vec{H} имеем $H2\pi r = NI$. Находим

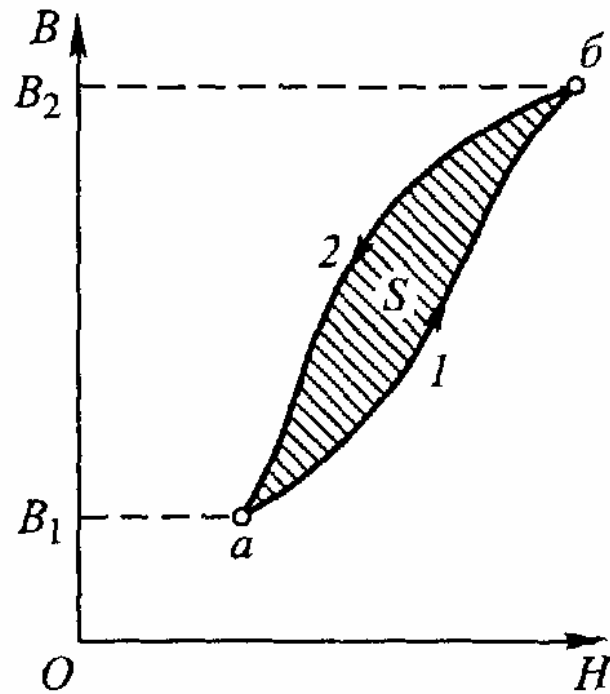
$$dW = dA = \frac{H2\pi r}{N} NSdB = HdB \underbrace{2\pi rS}_V.$$

Таким образом, работа dw , необходимая для увеличения индукции на $d\vec{B}$ в единице объема, равна $dw = \vec{H}d\vec{B} = \mu_0\vec{H}d(\vec{H} + \vec{I}) = \mu_0\vec{H}d\vec{H} + \underbrace{\mu_0\vec{H}d\vec{I}}_{\text{плотность энергии намагничивания}}.$

плотность
энергии
намагничивания

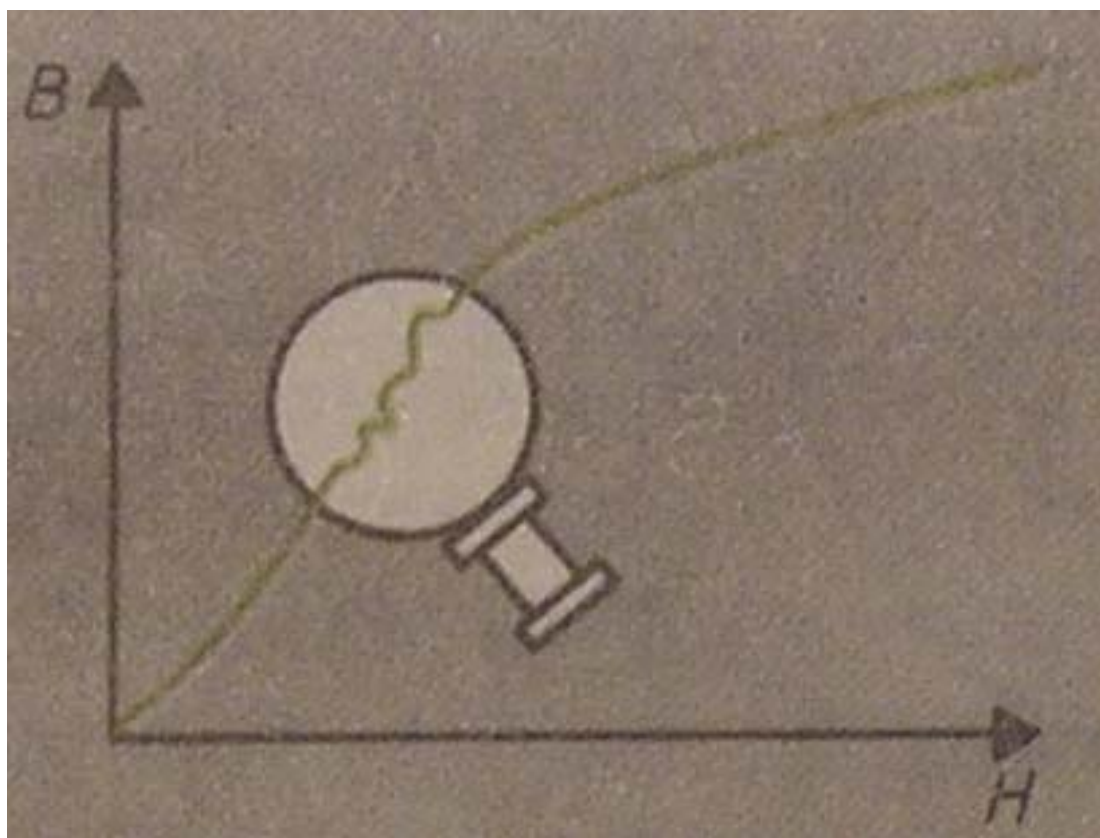


Работа намагничивания магнетика без гистерезиса



Работа при циклическом перемагничивании пропорциональна площади петли гистерезиса

Эффект Баркгаузена (1919).



Спонтанная намагниченность и температура Кюри.

Исследования показали, что даже в отсутствии внешнего магнитного поля ферромагнетик разбит на микроскопические области (домены), в которых ферромагнетик спонтанно намагничен до насыщения.

Спонтанная намагниченность ферромагнетика обусловлена ориентацией собственных магнитных моментов электронов ($\Gamma = -e/m$).

Ферромагнитное упорядочение существует только при температурах меньшей некоторого критического значения T_K . При $T > T_K$, ферромагнитное упорядочение пропадает и ферромагнетик превращается в парамагнетик. Зависимость магнитной проницаемости от температуры для таких парамагнетиков подчиняется закону Кюри-Вейса

$$\chi = \frac{C}{T - T_K}.$$

Температура Кюри некоторых ферромагнетиков

Вещество	$T_K, ^\circ\text{C}$	Вещество	$T_K, ^\circ\text{C}$
Кобальт	1150	Никель	360
Железо	770	30 %-ный пермаллой	70
78 %-ный пермаллой (сплав 22 % Fe, 78 % Ni)	550	Гадолиний	17

Механизм ориентации спинов ферромагнетика объясняет квантовая теория взаимодействия заряженных частиц (электронов) со спином $\hbar/2$ находящихся на незаполненных d-оболочках атомов ферромагнетика

$$W = -A \cdot \vec{S}_1 \vec{S}_2,$$

где A - обменная константа (интеграл). Если $A > 0$, то спинам энергетически выгодно ориентироваться параллельно (ферромагнитное упорядочение). Если $A < 0$, то выгодно антипараллельная ориентация (антиферромагнитное упорядочение).

Таким образом, ферромагнитное упорядочение обусловлено сильным обменным взаимодействием электронов атомов с нескомпенсированными спинами и имеет немагнитное происхождения. (Дорфман 1927)

Первая теория ферромагнетизма была разработана Вейсом в 1907 году по аналогии с теорией парамагнетизма Ланжевена, в которой дополнительно к микроскопическому полю добавлено гипотетическое "молекулярное поле"

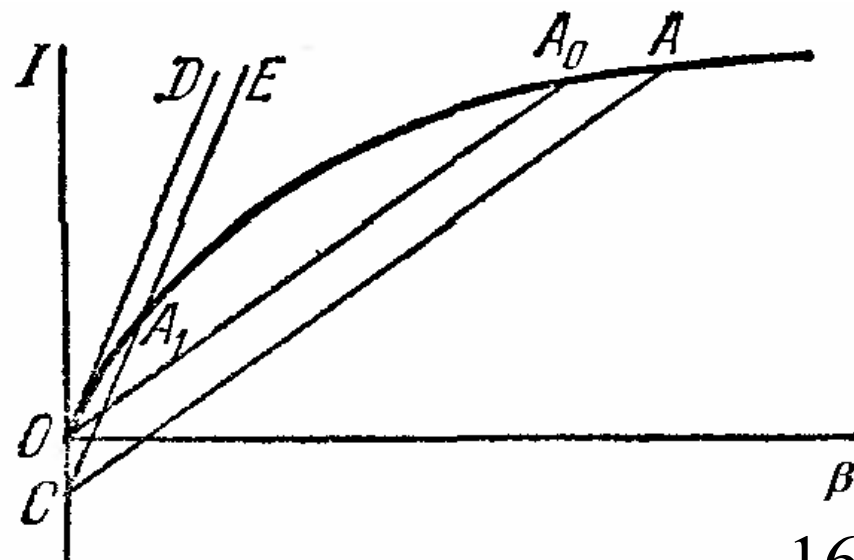
$$\vec{B}_{\text{эфф}} = \mu_0(\vec{H} + b\vec{I}),$$

где b - постоянная Вейса. Тогда для формулы Ланжевена получим

$$I = I_s L(\beta), \text{ где } I_s = np_m, \beta = \frac{\rho_m B_{\text{эфф}}}{k_B T}; \Rightarrow I = \frac{K_B T n}{I_s b \mu_0} \beta - \frac{H}{b}.$$

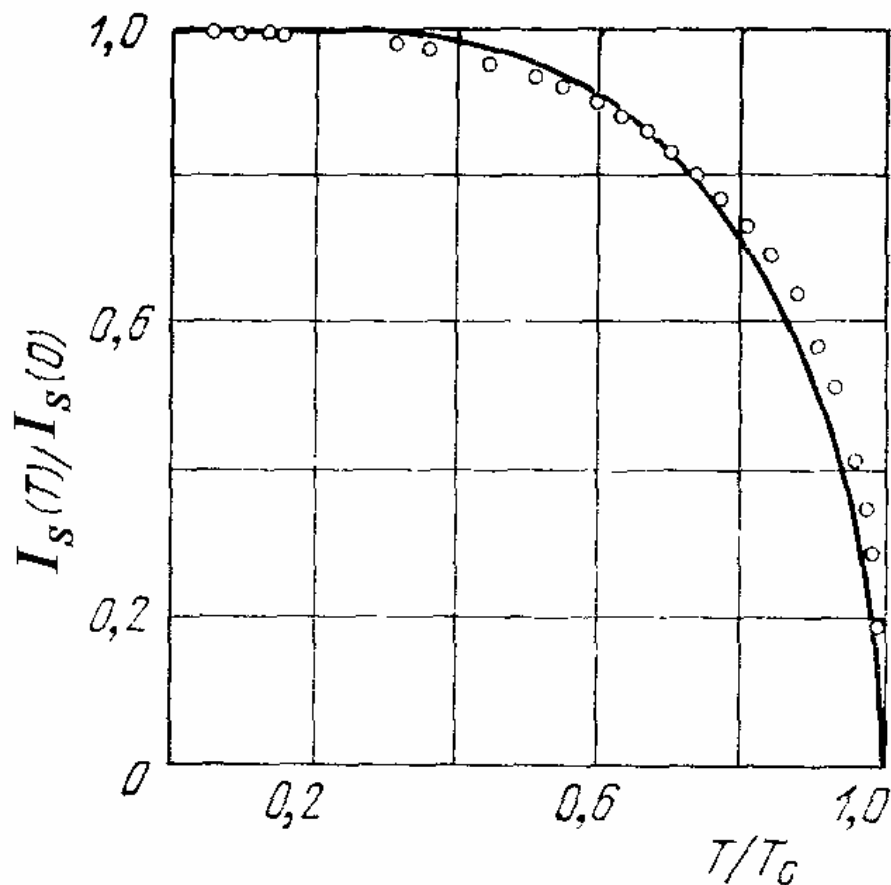
$$I = I_s L(\beta),$$

$$I = \frac{K_B T n}{I_s b \mu_0} \beta - \frac{H}{b}.$$



Наклон кривой OD определяет критическую температуру ферромагнитного упорядочения (фазовый переход 2-го рода).

Намагниченность насыщения ферромагнетика зависит от температуры

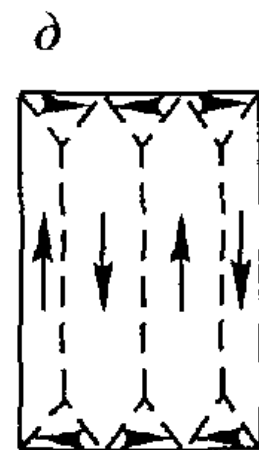
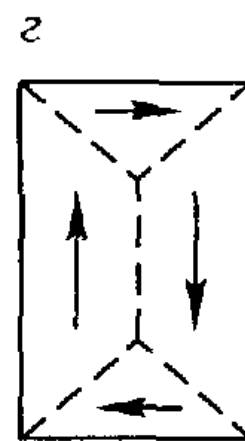
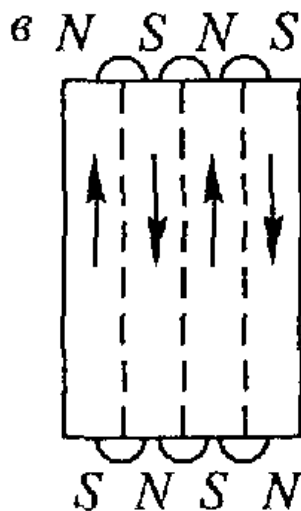
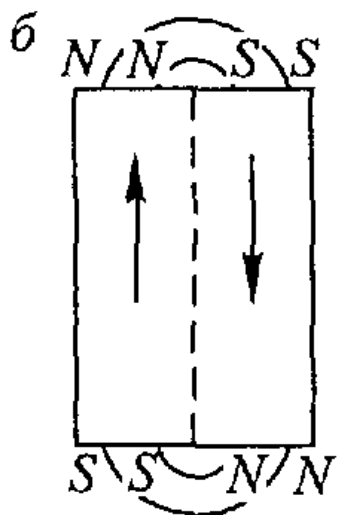
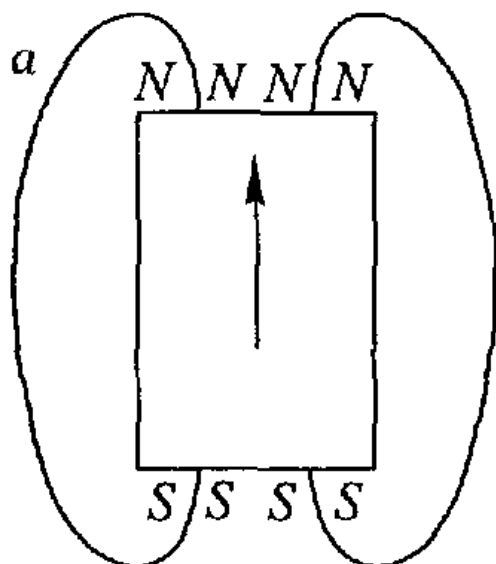


Намагниченность насыщения никеля как функция температуры. Сплошная кривая - теоретическая, построенная на $L_{1/2}(x)$.

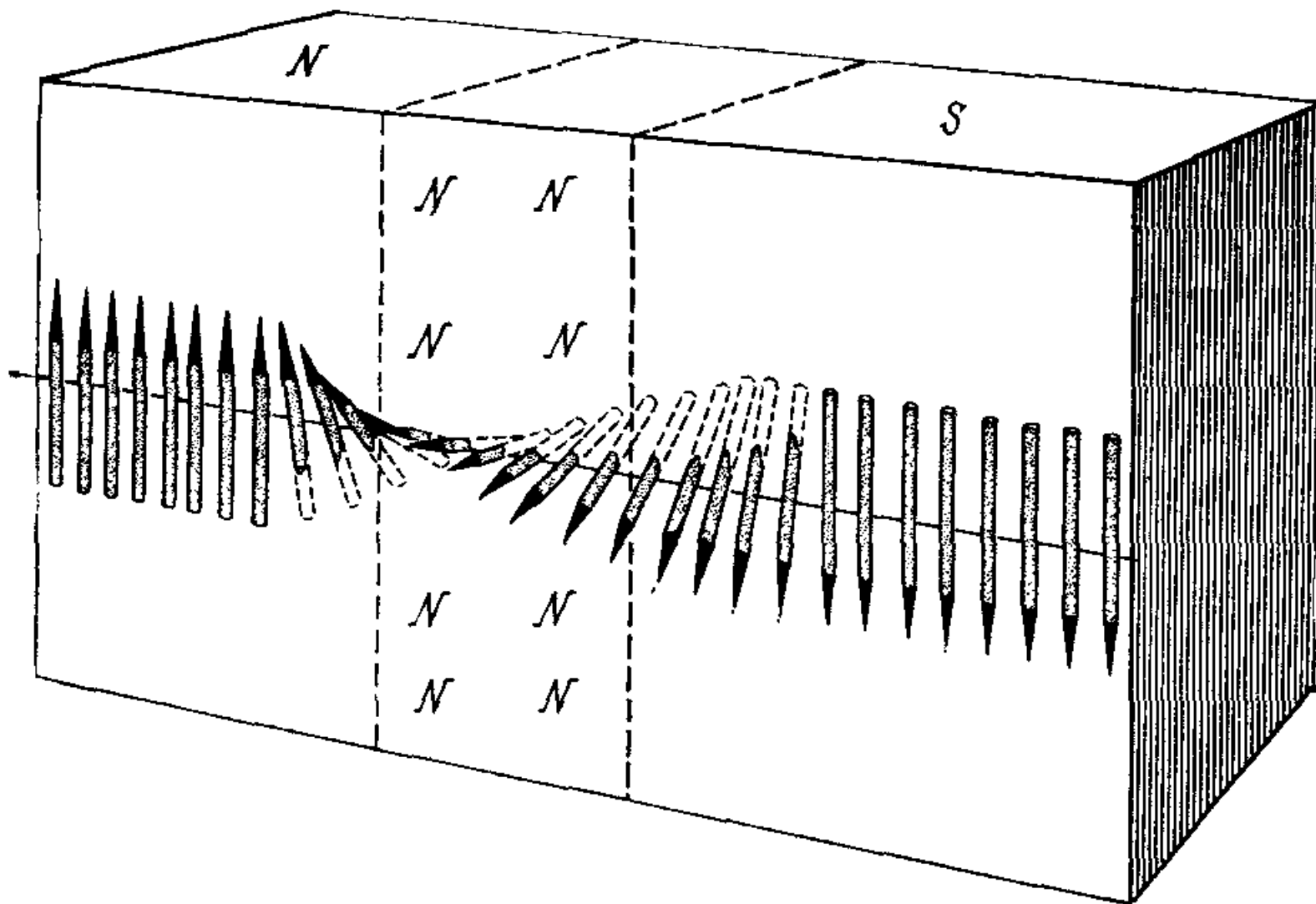
Ферромагнитные домены в кремнистой стали.



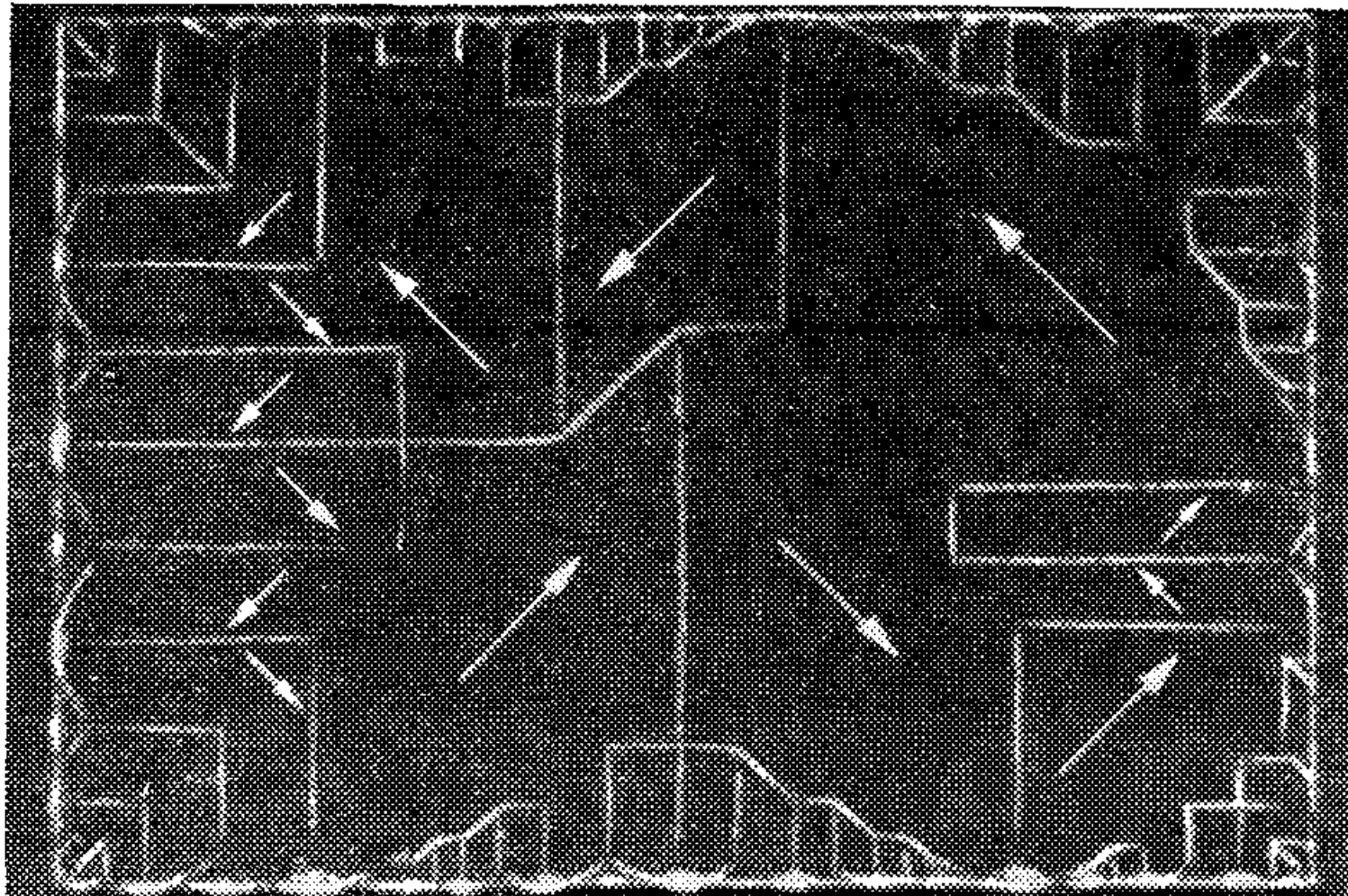
Механизм возникновения доменов

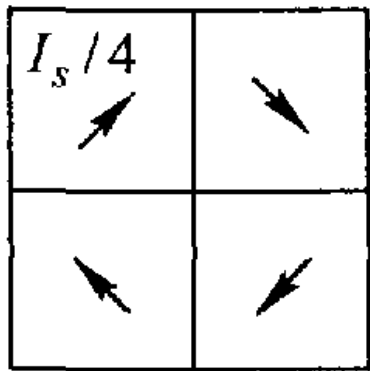


Доменная граница(стенка) Блоха

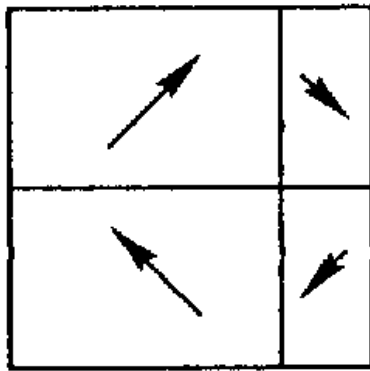


Доменная структура на поверхности
монокристаллической никелевой пластины

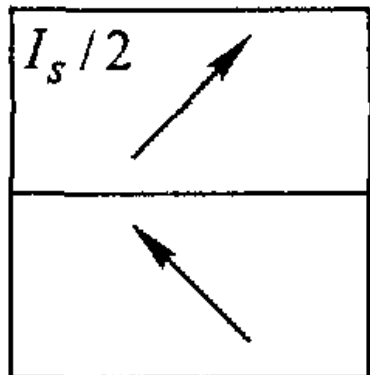




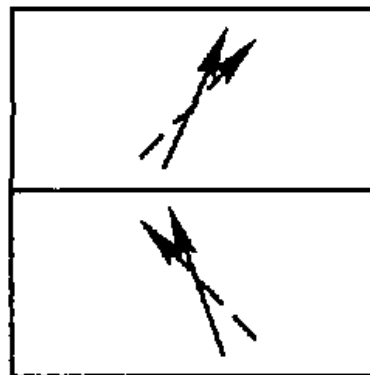
a



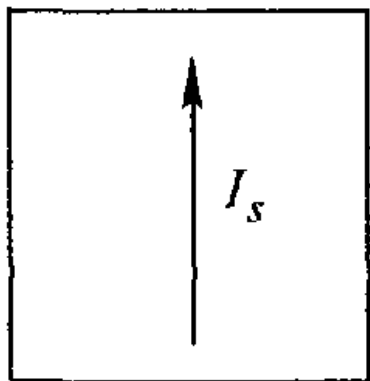
б



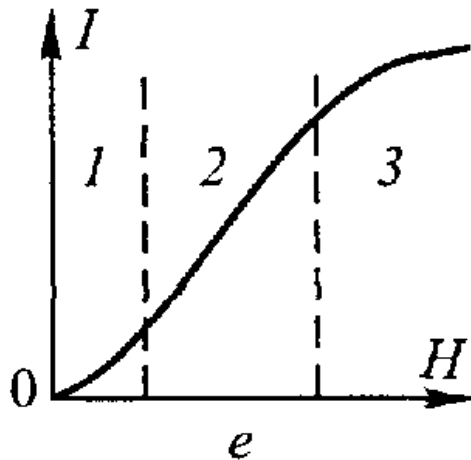
в



г



д

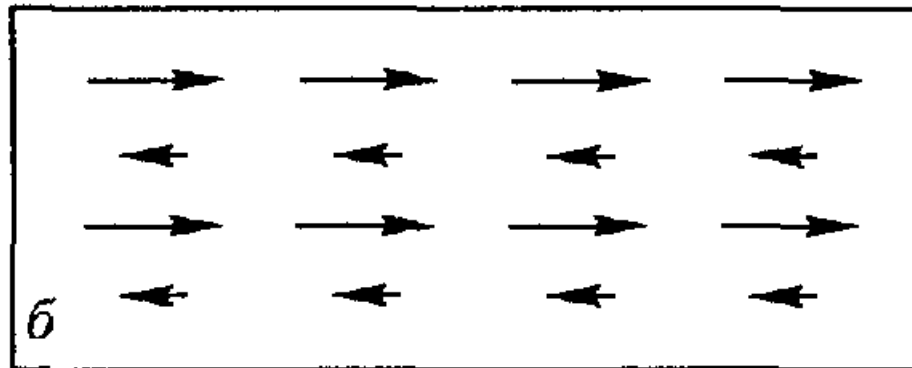
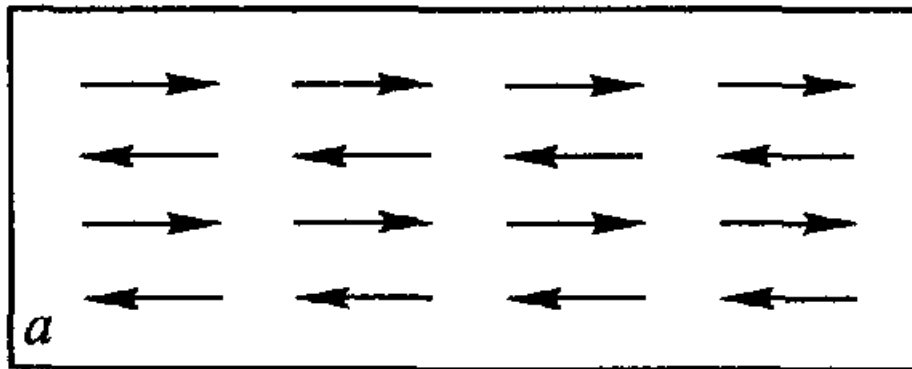


e

Различные типы процессов намагничивания ферромагнетика:

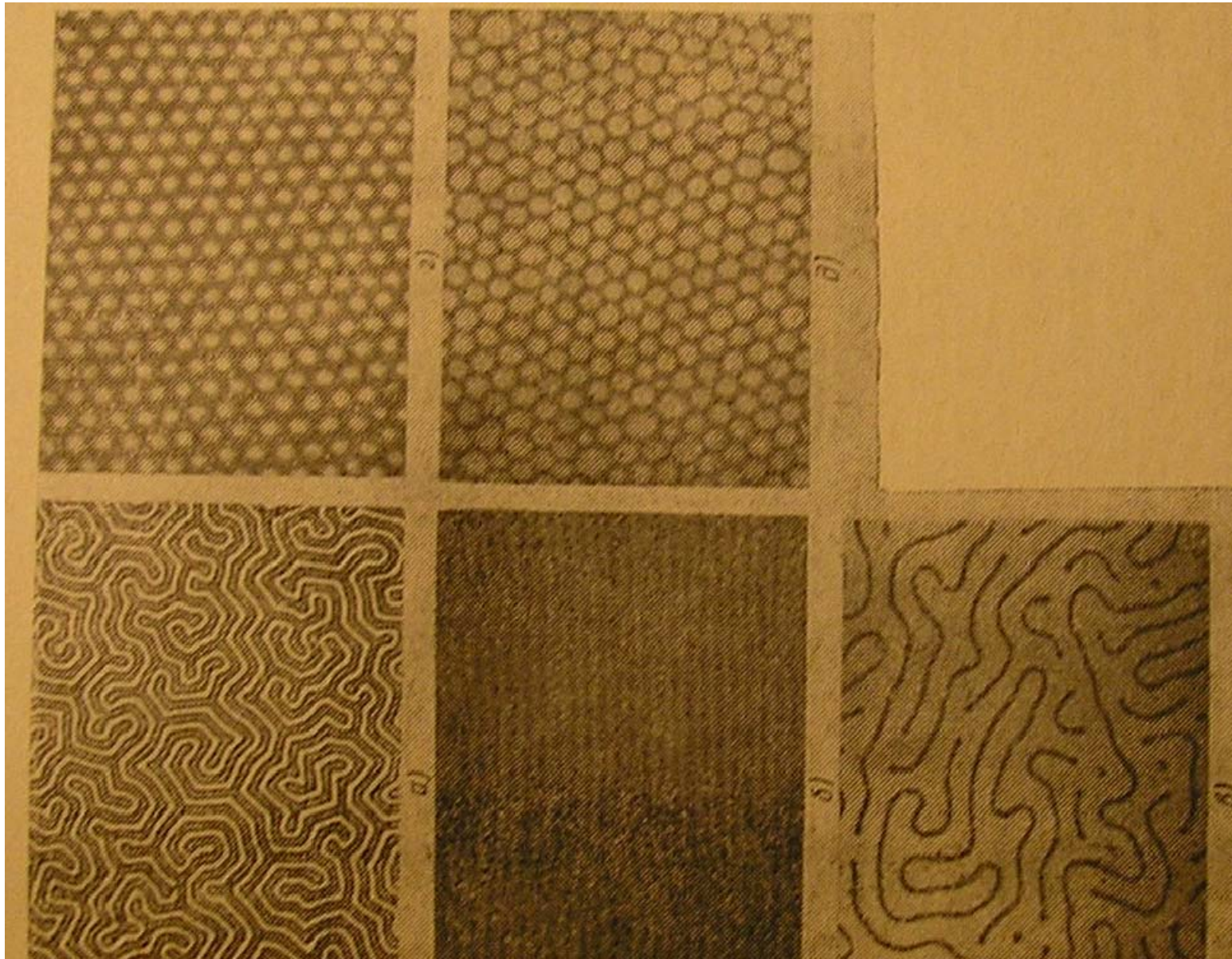
a – в) смещение границ, *г*) намагничивание вращения, *д*) намагничивание насыщения; участок 1 - обратимое смещение ДГ, 2 - исчезновение невыгодных доменов, 3 - вращение намагниченности внутри домена.

Антиферромагнетики. Ферриты. Суперпарамагнетики.

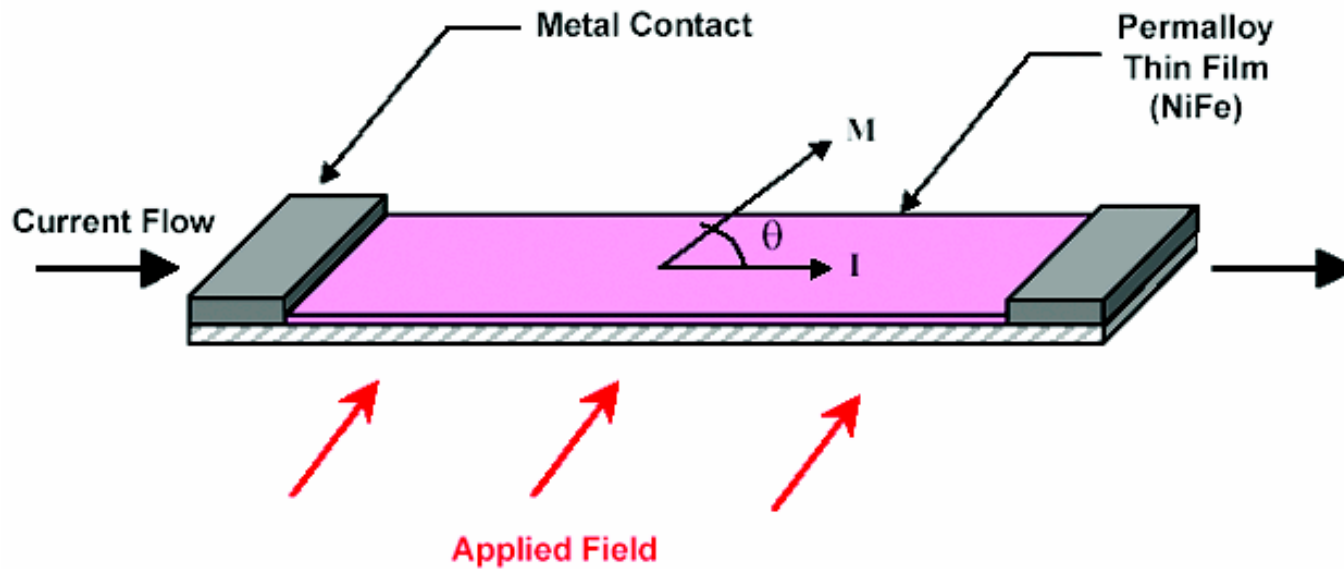


Ферриты - обладают большим удельным сопротивлением, то есть являются магнитными полупроводниками. Находят важное применение в радиотехнике СВЧ. Ферриты-гранаты являются магнитными диэлектриками. Прозрачны для света.

Доменная структура тонких магнитоодносных пластин ЖИГ с сильной анизотропией



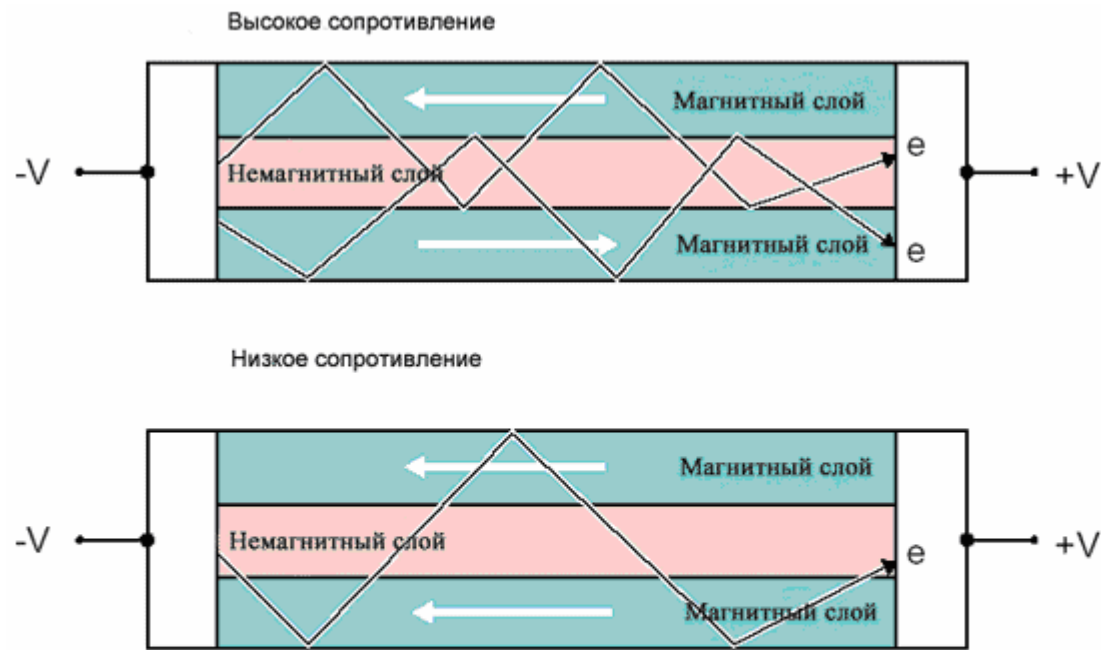
Анизотропный магниторезистивный эффект



$$\Delta R = \frac{\Delta\rho}{\rho} R \cos^2 \theta$$

Гигантский магниторезистивный (ГМР) эффект.

Спинтроника.



ГМР датчик.

Альберт Ферт (Albert Fert) и Петер Грюнберг (Peter Grunberg)

Нобелевская премия 2007 год.

