

**Содержательный
модуль 5**



"Электротехнические материалы"

Лекция 12

Магнитные материалы

Lec_12_el_mat_1MM_LNA_23-04-2015

Доцент Лалазарова Н.А.

Содержание



12.1. Магнитное строение вещества



12.2. Классификация магнитных материалов в зависимости от величины и знака магнитной восприимчивости



12.3. Ферромагнетики



12.4. Магнитный гистерезис и основные характеристики магнитных материалов



12.5. Влияние различных факторов на характеристики магнитных материалов



12.6. Классификация магнитных материалов

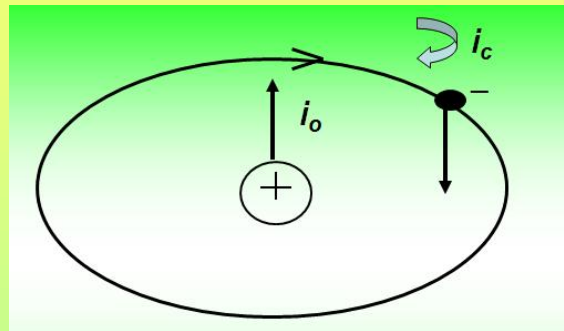


Задания для самостоятельной работы

12.1. МАГНИТНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Материалы, которые способны под действием внешнего магнитного поля намагничиваться, то есть приобретать определённые магнитные свойства, называются магнитными материалами.

Намагничивание связано с наличием у составляющих материал атомов (или ионов, молекул) микроскопических магнитных моментов, появление которых объясняется существованием микроскопических токов, связанных с орбитальным движением электронов и наличием электронных спинов.



Макроскопической характеристикой намагничивания является величина намагниченности M равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объёма:

$$M = K_m \cdot H$$

где K_m – магнитная восприимчивость материала;

H – напряжённость внешнего магнитного поля, А/м.



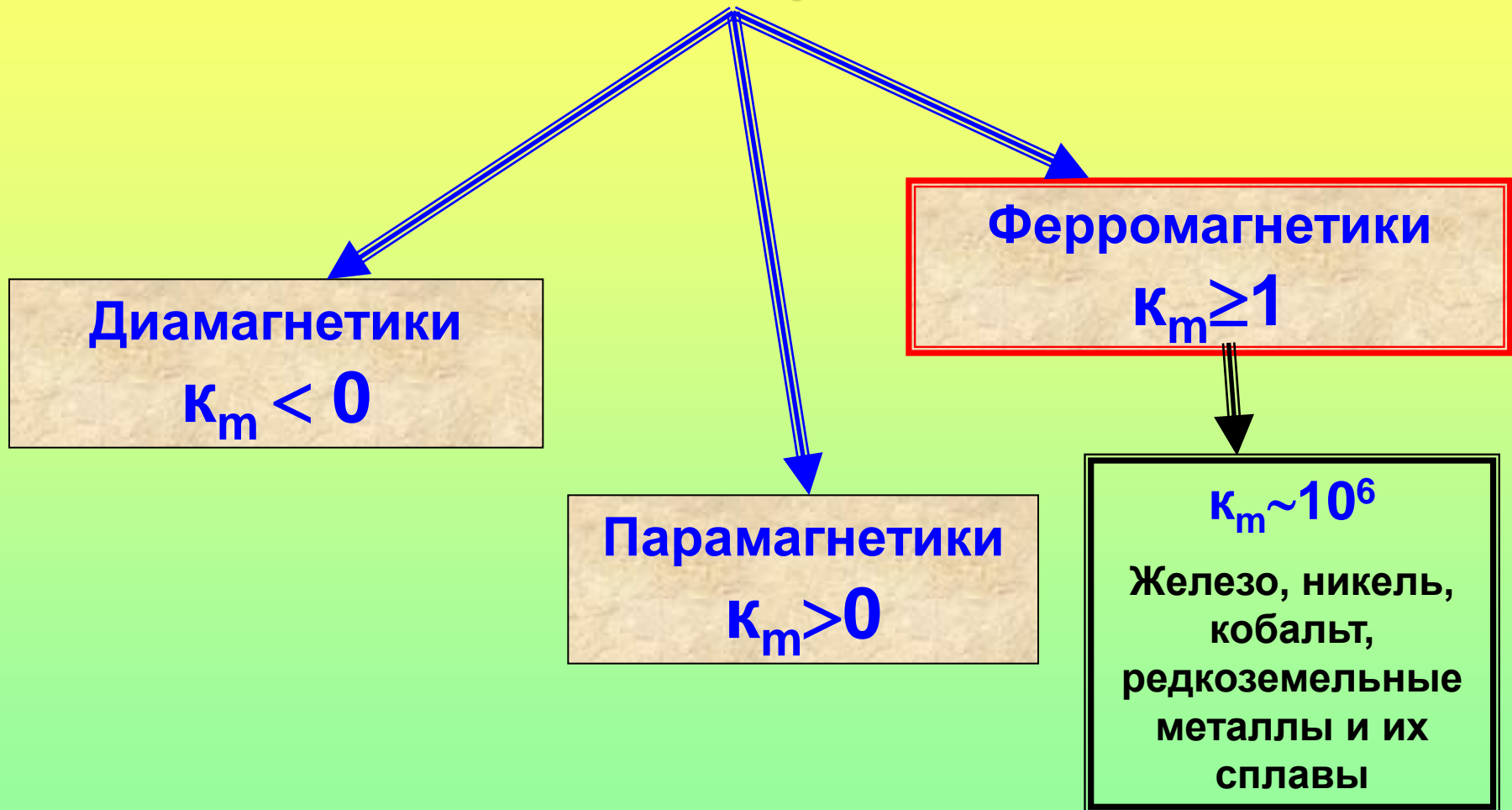
Контрольные вопросы

1. В чём причины возникновения магнетизма?

2. Как определяется величина намагниченности?

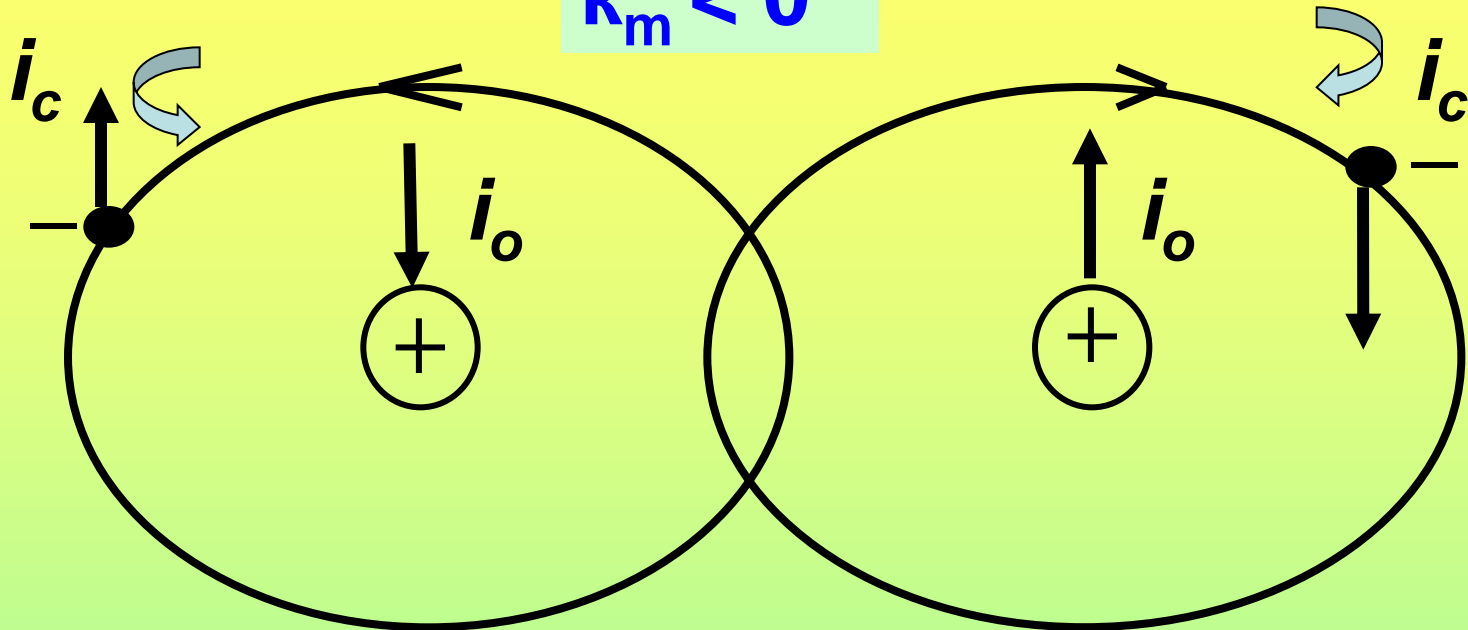


12.2. Классификация магнитных материалов в зависимости от величины и знака магнитной восприимчивости



ДИАМАГНЕТИКИ

$$\kappa_m < 0$$



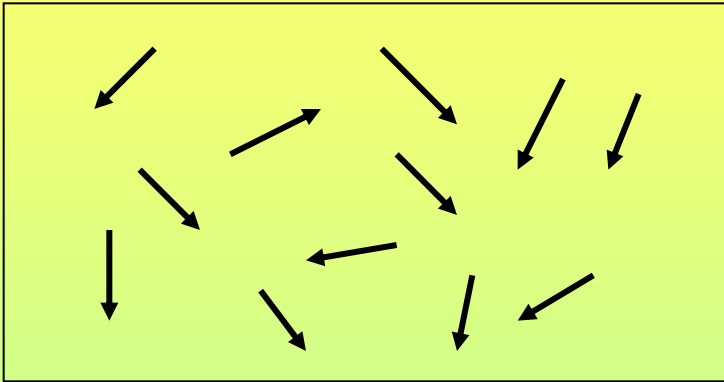
Элементарная модель молекулы водорода

Диамagnетики – материалы, которые намагничиваются противоположно приложенному полю и ослабляют его, $\kappa_m < 1$: инертные газы, кремний, германий, стёкла. Диамagnetизм присущ всем веществам, но выражен слабо.

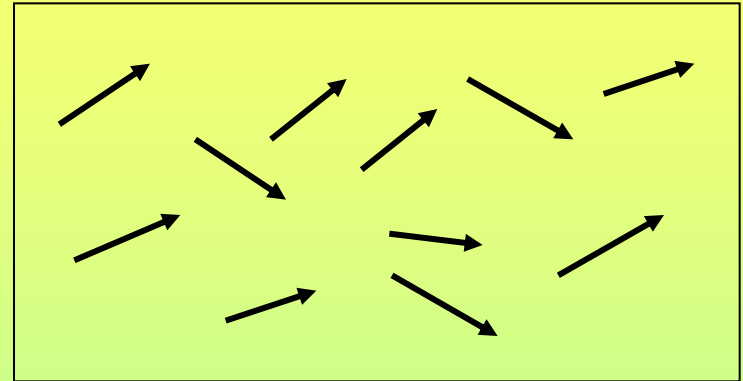


ПАРАМАГНЕТИКИ

$$\kappa_m > 0$$



В отсутствии
внешнего поля



При наложении внеш-
него поля

Парамагнетики – материалы, которые имеют $\kappa_m > 1$ и слабо намагничиваются внешним полем: калий, натрий, молибден и др.



Контрольные вопросы

1. В чём причины возникновения магнетизма?

2. Как определяется величина намагниченности?

3. Что такое парамагнетики?

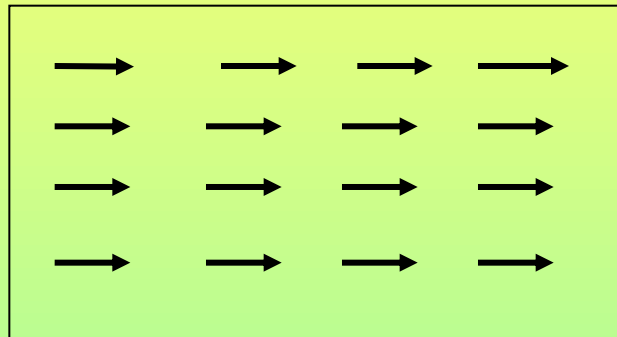
2. Что такое диамагнетики?



12.3. ФЕРРОМАГНЕТИКИ

$$\kappa_m \geq 1$$

Схема ориентации магнитных моментов у ферромагнетиков

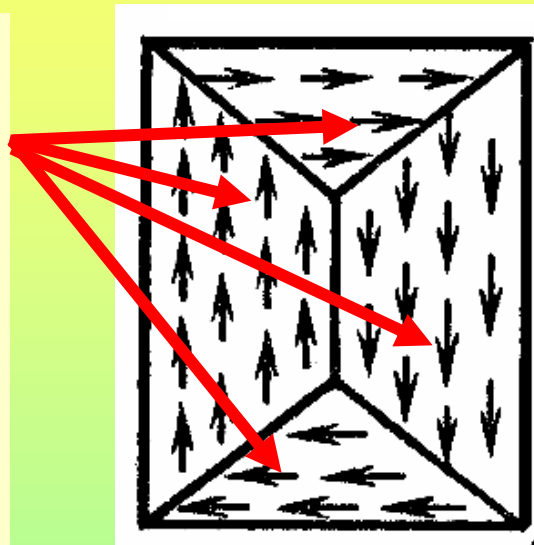


Ферромагнетики – это материалы с ярко выраженными магнитными свойствами, характеризуются большими значениями магнитной восприимчивости (для железа, никеля, кобальта $\kappa_m \sim 10^6$).

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Свойства ферромагнетиков обусловлены их доменным строением.

Домены – макроскопические области (10^{-4} - 10^{-6} м), намагниченные практически до насыщения даже в отсутствие магнитного поля.



Энергетически выгодная четырёхдоменная структура с замкнутым магнитным полем

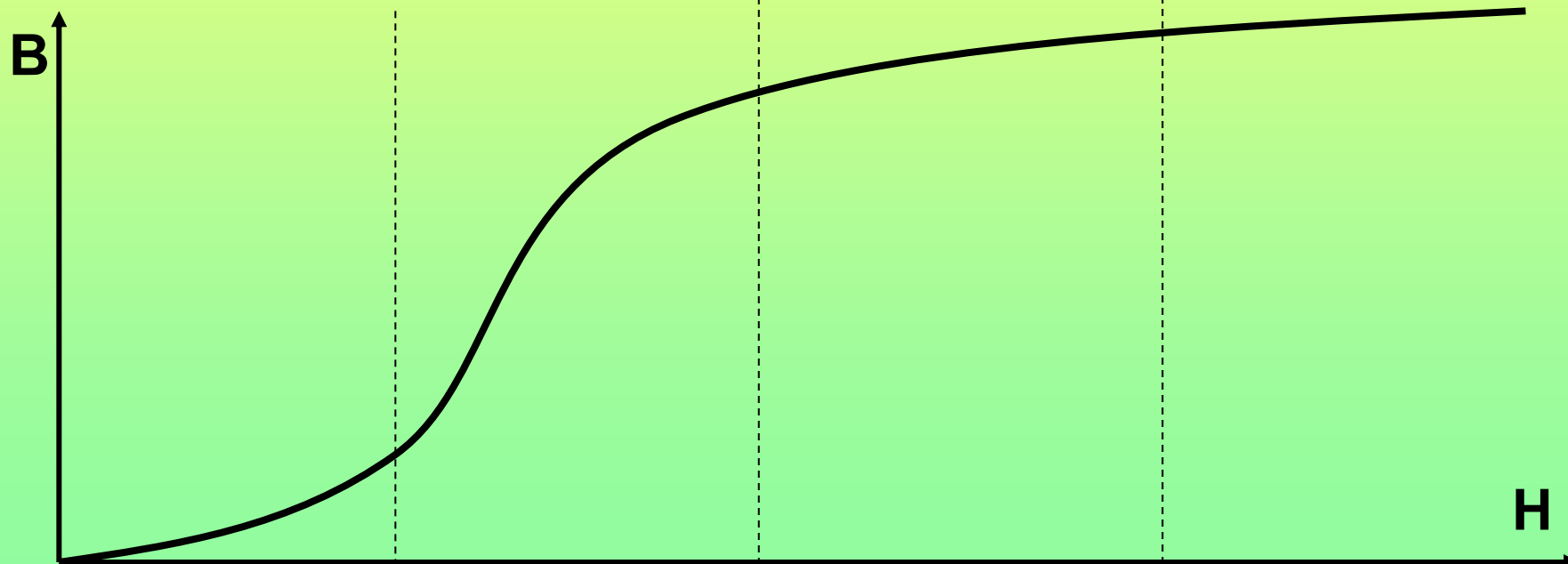
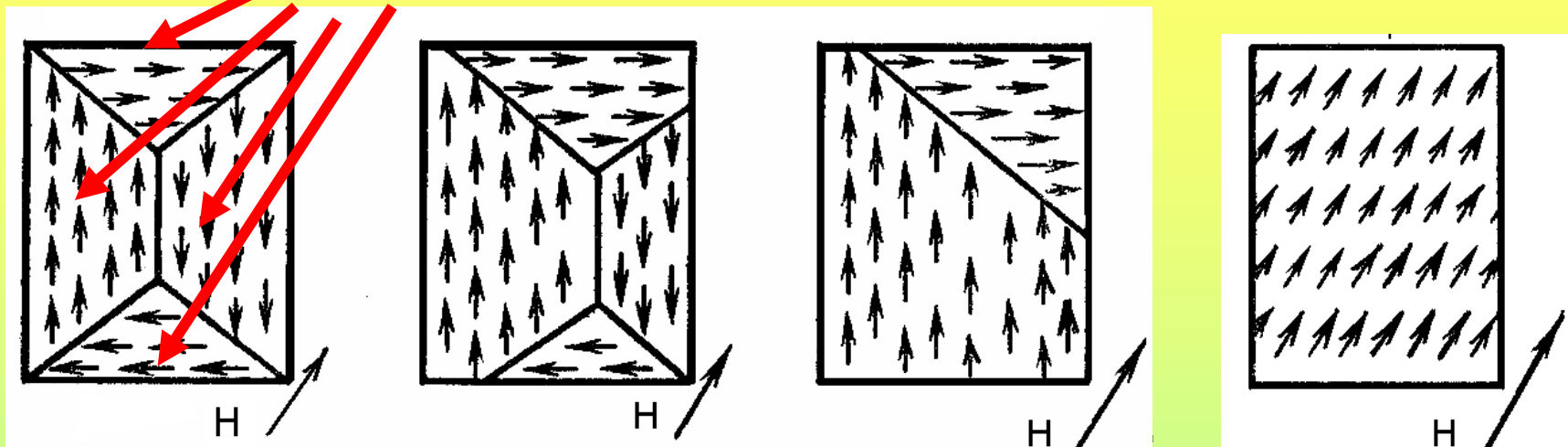
Домены разделены между собой доменными границами (размерами в несколько сотен межатомных расстояний).

В пределах границы происходит постепенное изменение ориентации магнитных моментов.

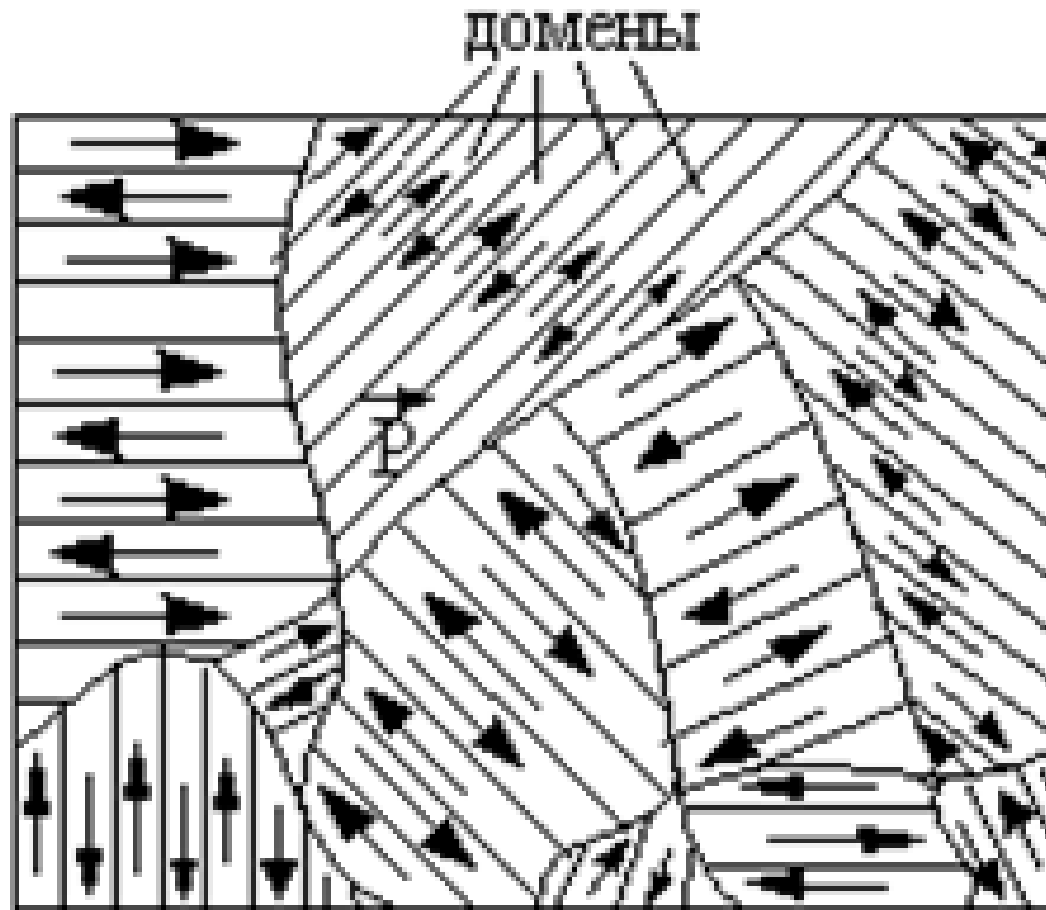


ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЕЩЕСТВА

Домены



ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЕЩЕСТВА



ПОЛИКРИСТАЛЛ



ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЕЩЕСТВА

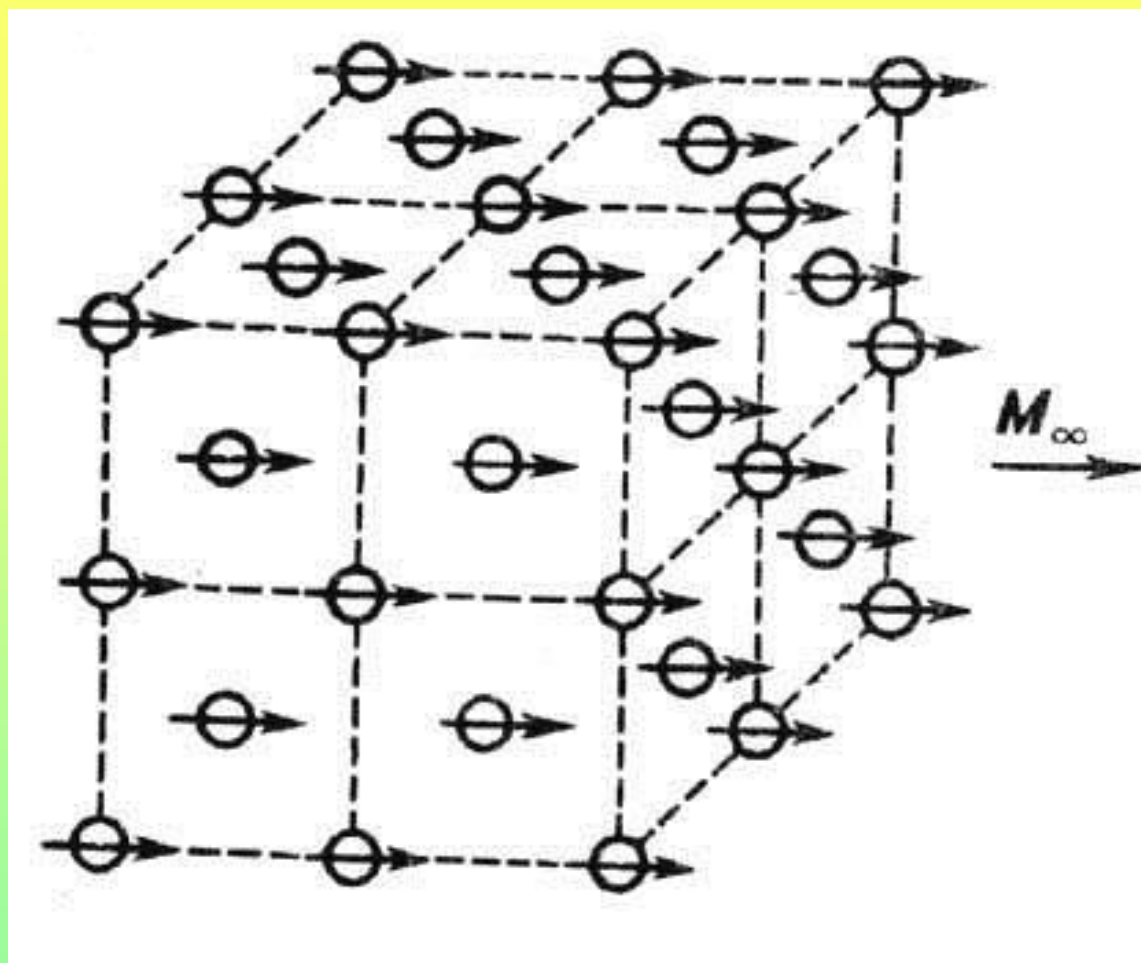
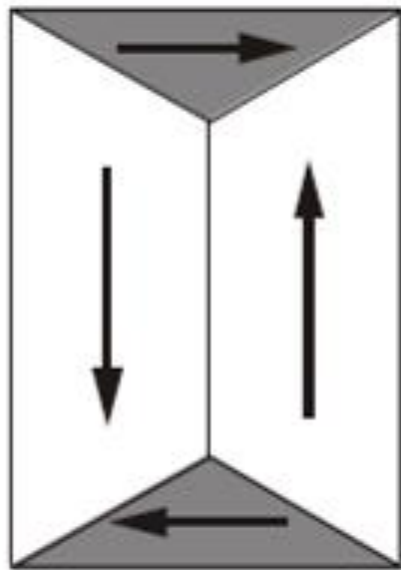


Схема расположения моментов атомов в пределах домена



ПРОЦЕССЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ВЕЩЕСТВА

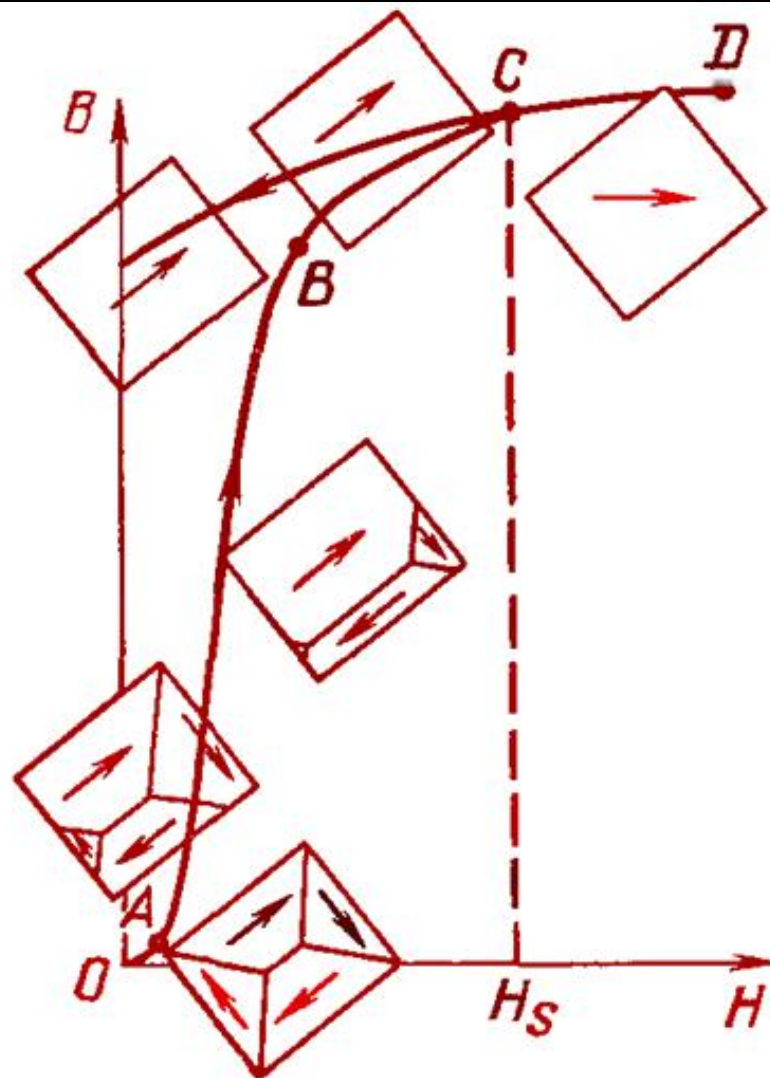


Магнитная доменная структура:

энергетически выгодная плоская четырехдоменная структура с замкнутым магнитным полем. Стрелками показаны направления векторов спонтанной намагниченности \vec{M}_s

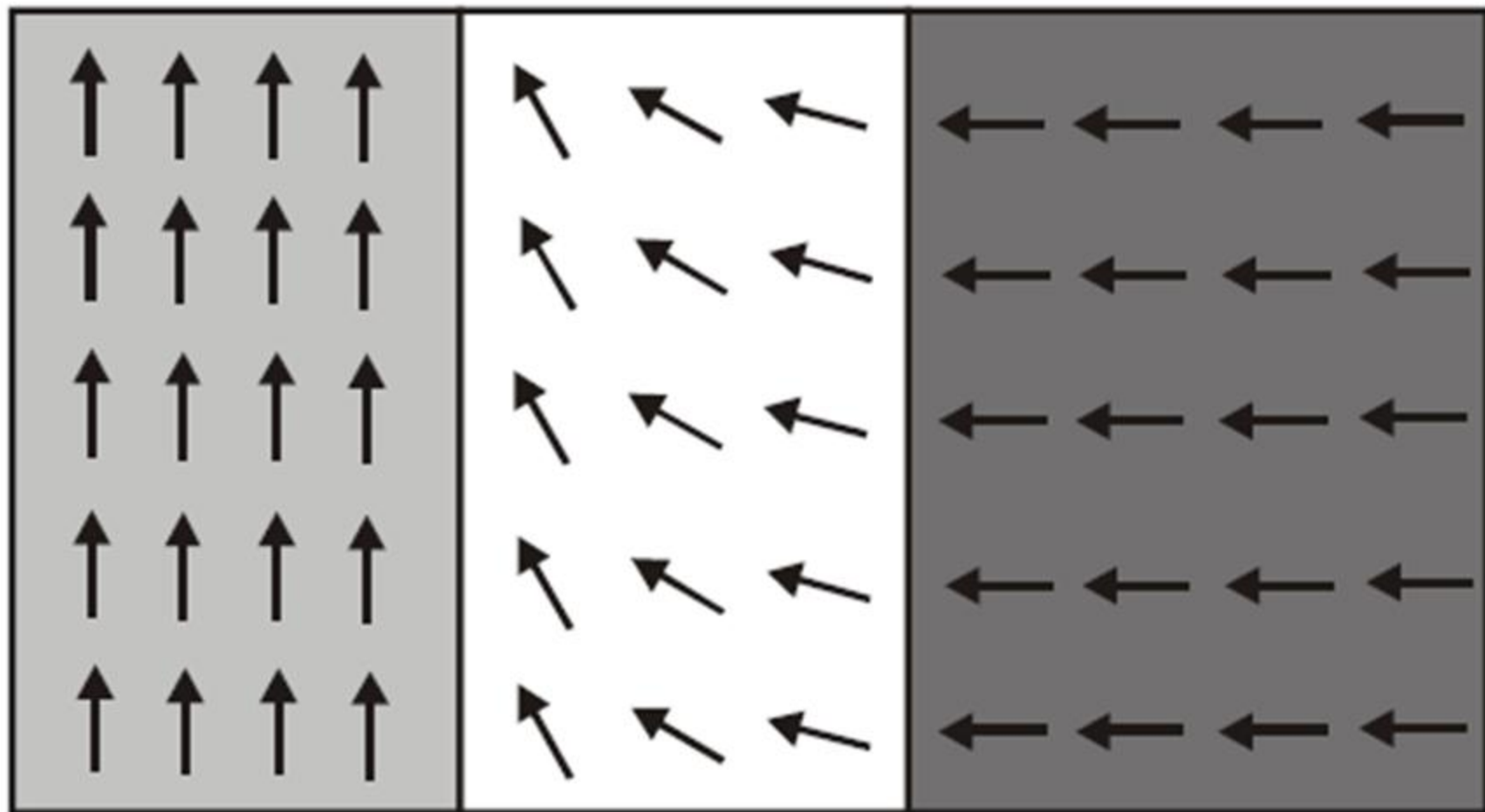
В доменах магнитные моменты атомов ориентированы параллельно определенному кристаллографическому направлению. Каждый домен спонтанно намагничен до насыщения, но равновероятное пространственное расположение векторов магнитных моментов приводит к образованию замкнутых магнитных цепей внутри образца, и результирующий магнитный момент равен нулю.





Изменение индукции и доменной структуры при намагничивании ферромагнетика





Изменение ориентации магнитных моментов атомов в магнитной стенке:

белым цветом показана доменная стенка, серым – домены



Контрольные вопросы

1. Что такое домены?

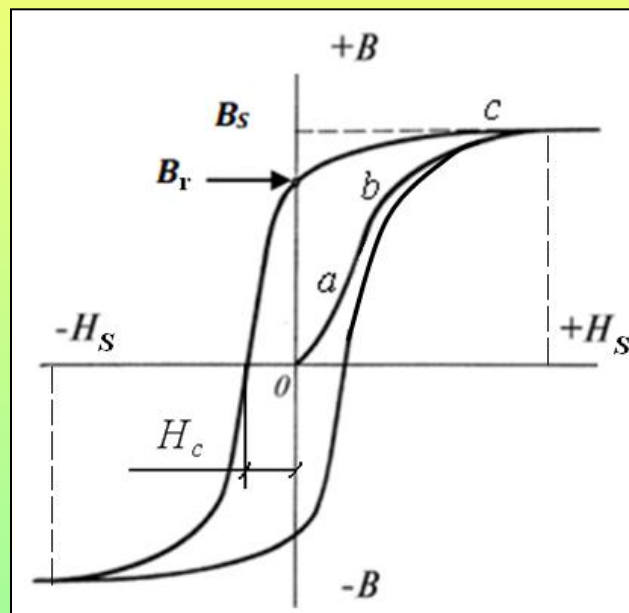
2. Как происходит процесс намагничивания ферромагнетиков?



5.4. МАГНИТНЫЙ ГИСТЕРЕЗИС И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Если напряжённость магнитного поля плавно увеличивать, то магнитная индукция B помещённого в этом поле магнитного материала будет возрастать по кривой, называемой кривой первоначального намагничивания (кривая Oac).

Магнитная индукция B вначале быстро возрастает, а начиная с величины её B_s почти не изменяется. B_s - **индукция насыщения** (полная ориентация векторов намагниченности вдоль поля).



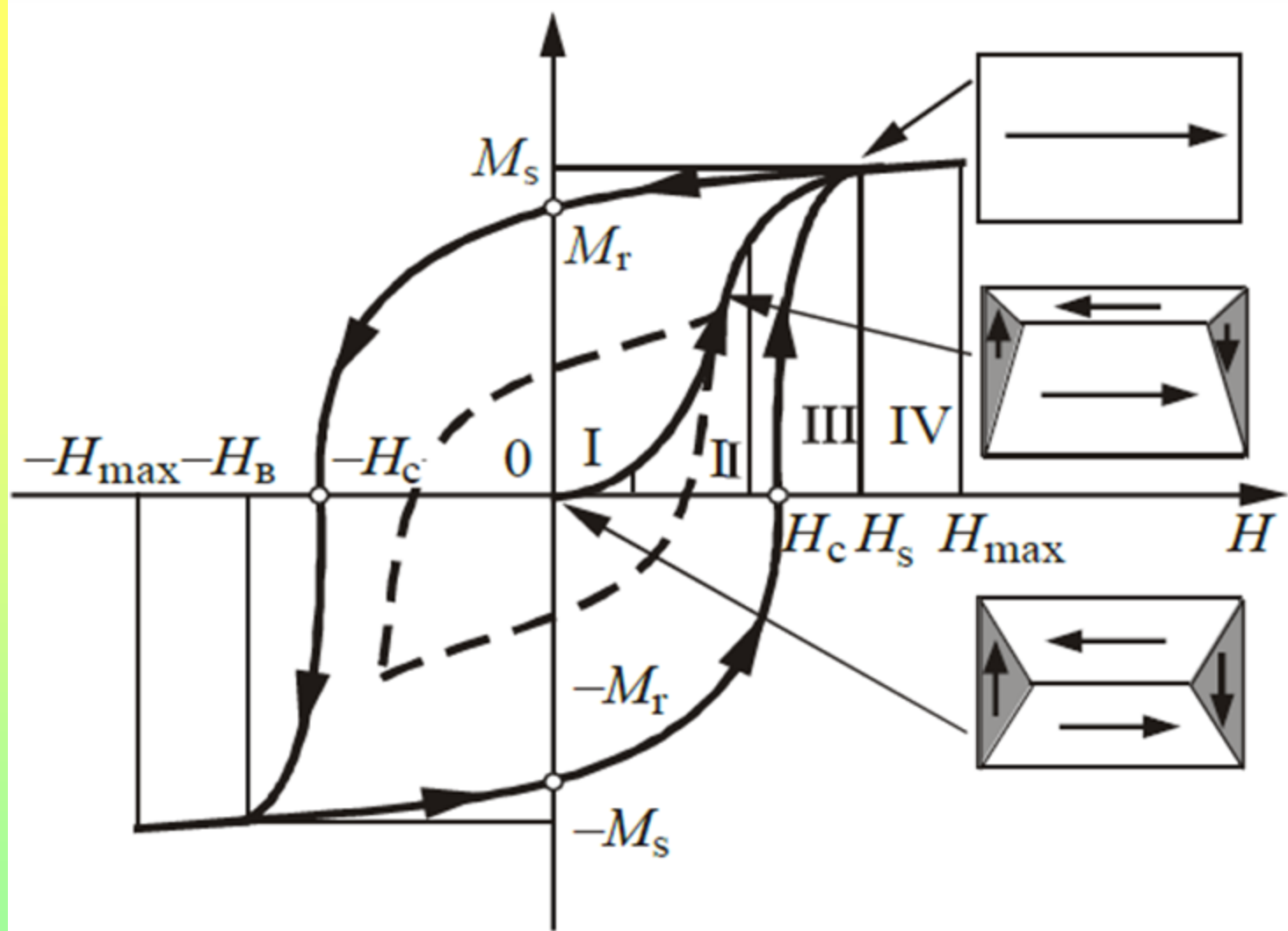
Кривая намагничивания и петля гистерезиса

B_r - **остаточная магнитная индукция.**

Напряжённость поля, при которой индукция станет равной нулю, называется **коэрцитивной силой H_c .**

По гистерезисной кривой определяются основные магнитные характеристики, важна форма кривой, её ширина, площадь. Площадь, ограниченная петлёй гистерезиса, определяет потери на гистерезис или на перемагничивание.





Зависимость намагниченности ферромагнетика
от величины приложенного поля:

штриховой кривой показана частная петля гистерезиса

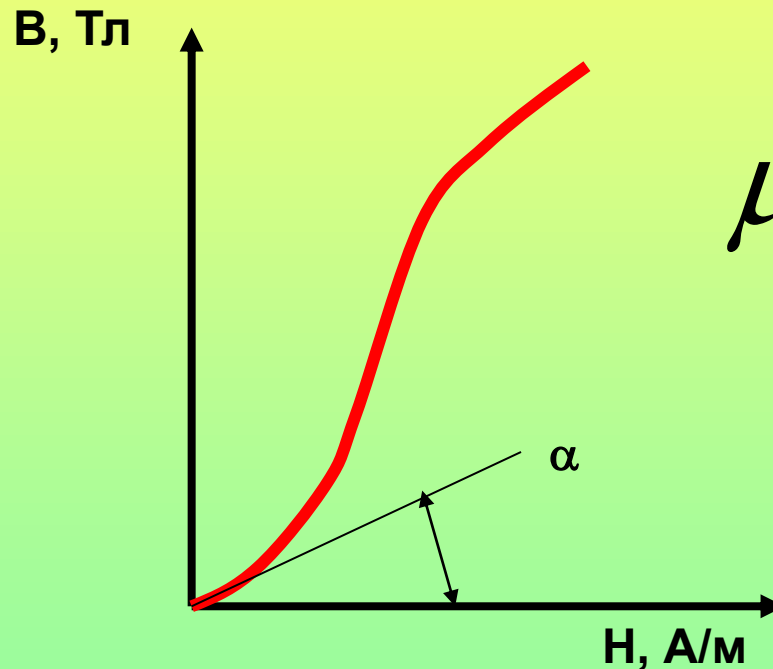


ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Если **B** – магнитная индукция - характеризует плотность магнитного потока, то интенсивность роста индукции при увеличении напряжённости намагничивающего поля, характеризует магнитная проницаемость μ .

Магнитная проницаемость равна тангенсу угла наклона касательной к начальной кривой намагничивания:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha$$



$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

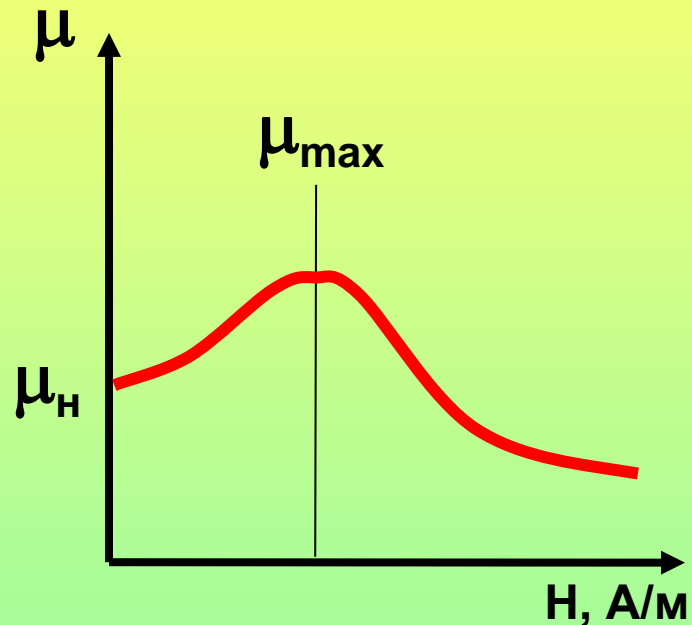
где μ_0 – магнитная постоянная,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитная проницаемость характеризует способность материала намагничиваться внешним полем.

Различают начальную μ_H и максимальную μ_{max} магнитную проницаемость.



Кроме абсолютной магнитной проницаемости μ_H , имеющей размерность Гн/м, используют безразмерную относительную магнитную проницаемость $\mu' = \mu / \mu_0$.

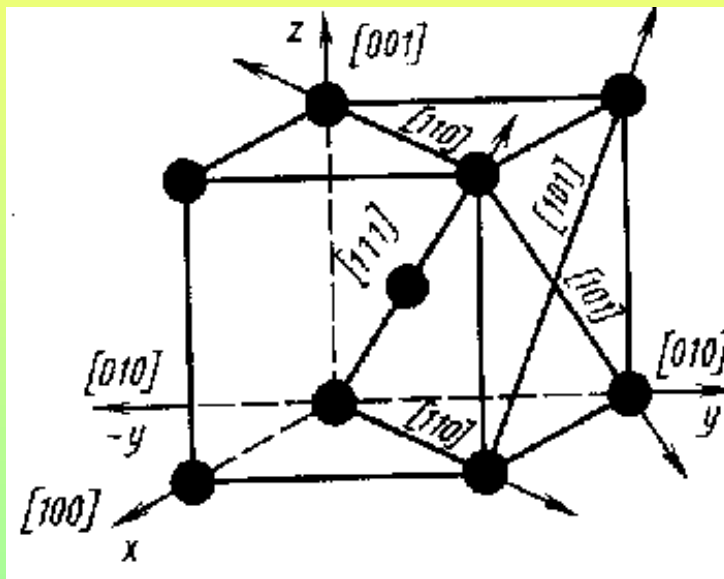
μ' связана с магнитной восприимчивостью соотношением: $\mu' = 1 + \kappa_m$.



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изменение магнитного состояния ферромагнитного образца сопровождается изменением его линейных размеров и объёма. Это явление называется **магнитострикцией**.

Различают коэффициент линейной магнитострикции λ и объёмной магнитострикции соответственно λ_s .

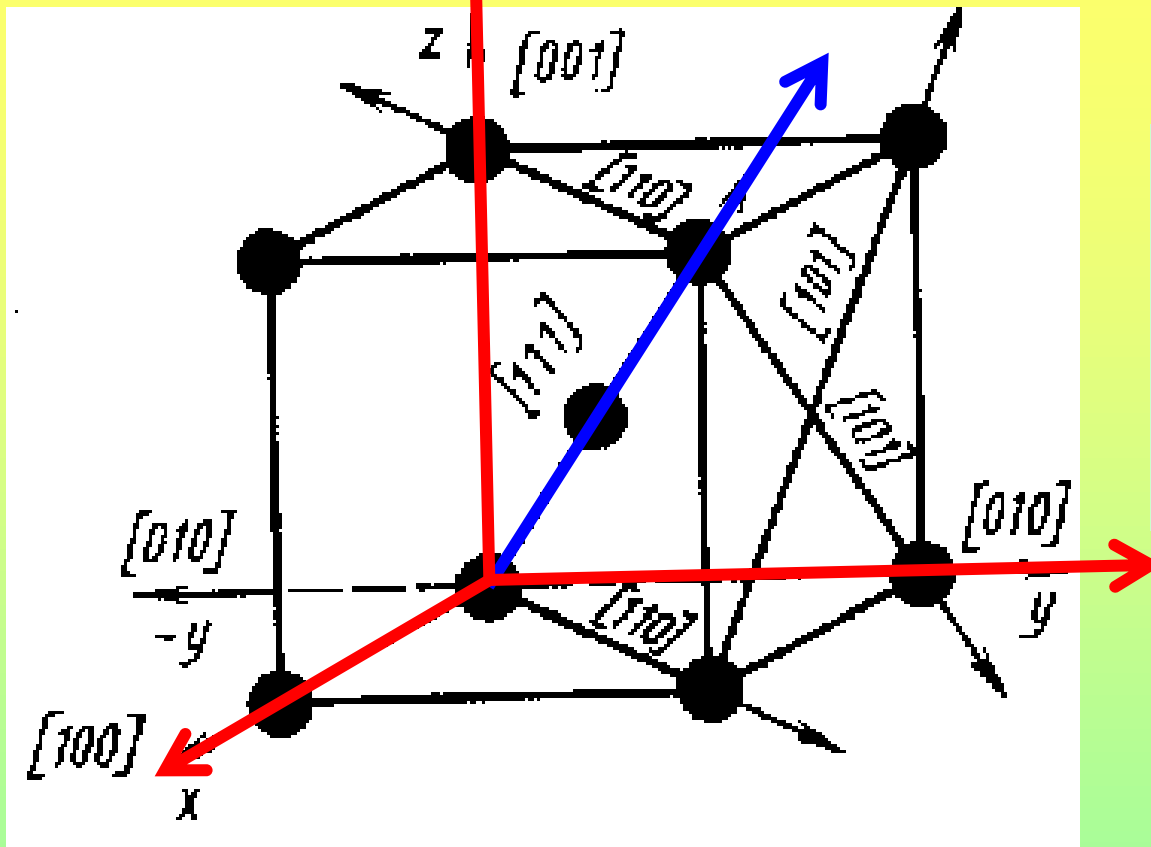


Намагниченность монокристалла ферромагнетика **анизотропна**. Кристалл железа в направлении ребра куба намагничивается до насыщения при значительно меньшей напряжённости поля, чем в направлении диагонали куба.

Константой кристаллографической магнитной анизотропии K называется удельная энергия (Дж/м³), которую необходимо затратить на перемагничивание из направления лёгкого намагничивания в направление трудного намагничивания.



МАГНИТОСТРИКЦИЯ



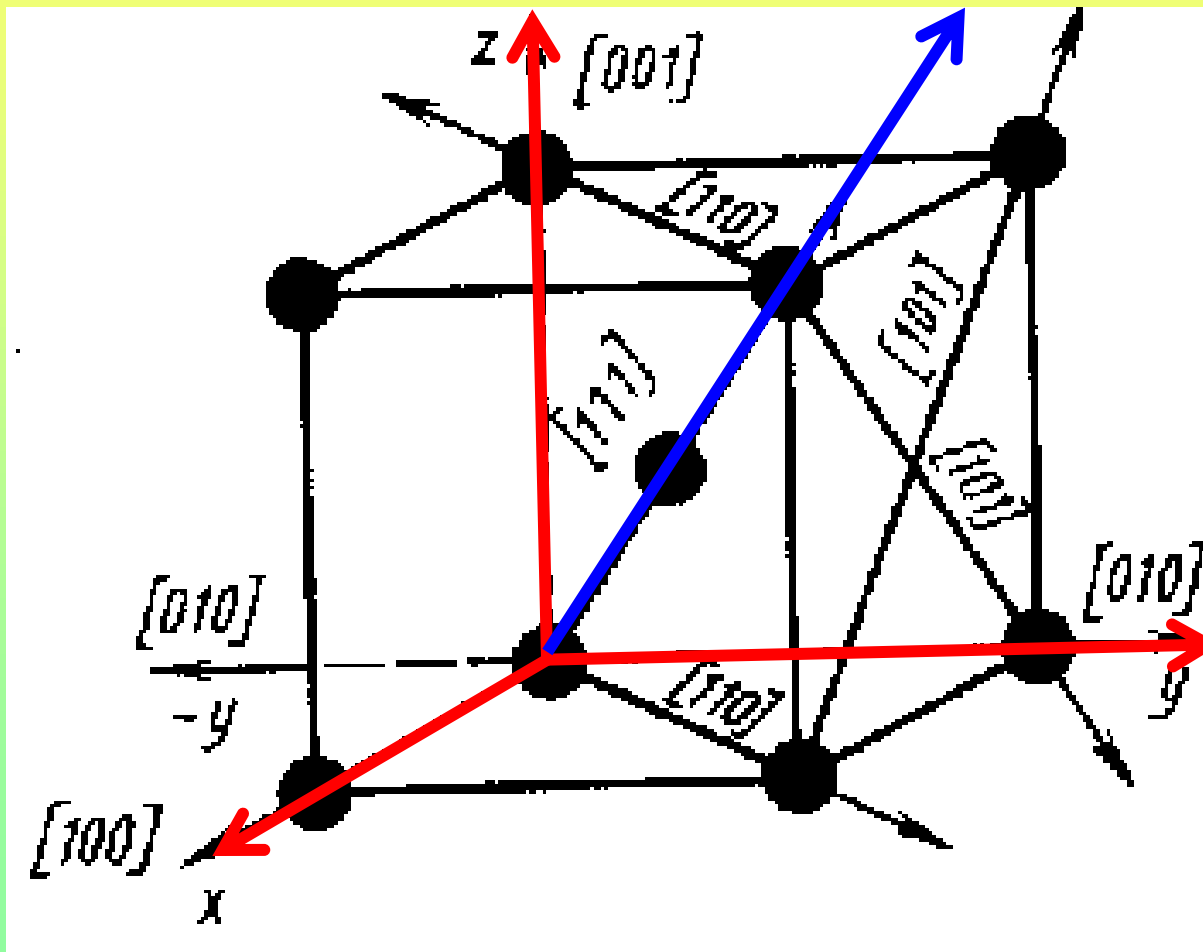
Намагниченность вдоль диагонали приводит к растяжению (увеличивает размер).

Намагниченность вдоль ребра приводит к сжатию (уменьшает размер).



АНИЗОТРОПИЯ

Намагниченность кристалла ферромагнетика анизотропна. Константа кристаллографической магнитной анизотропии K (Дж/м³).

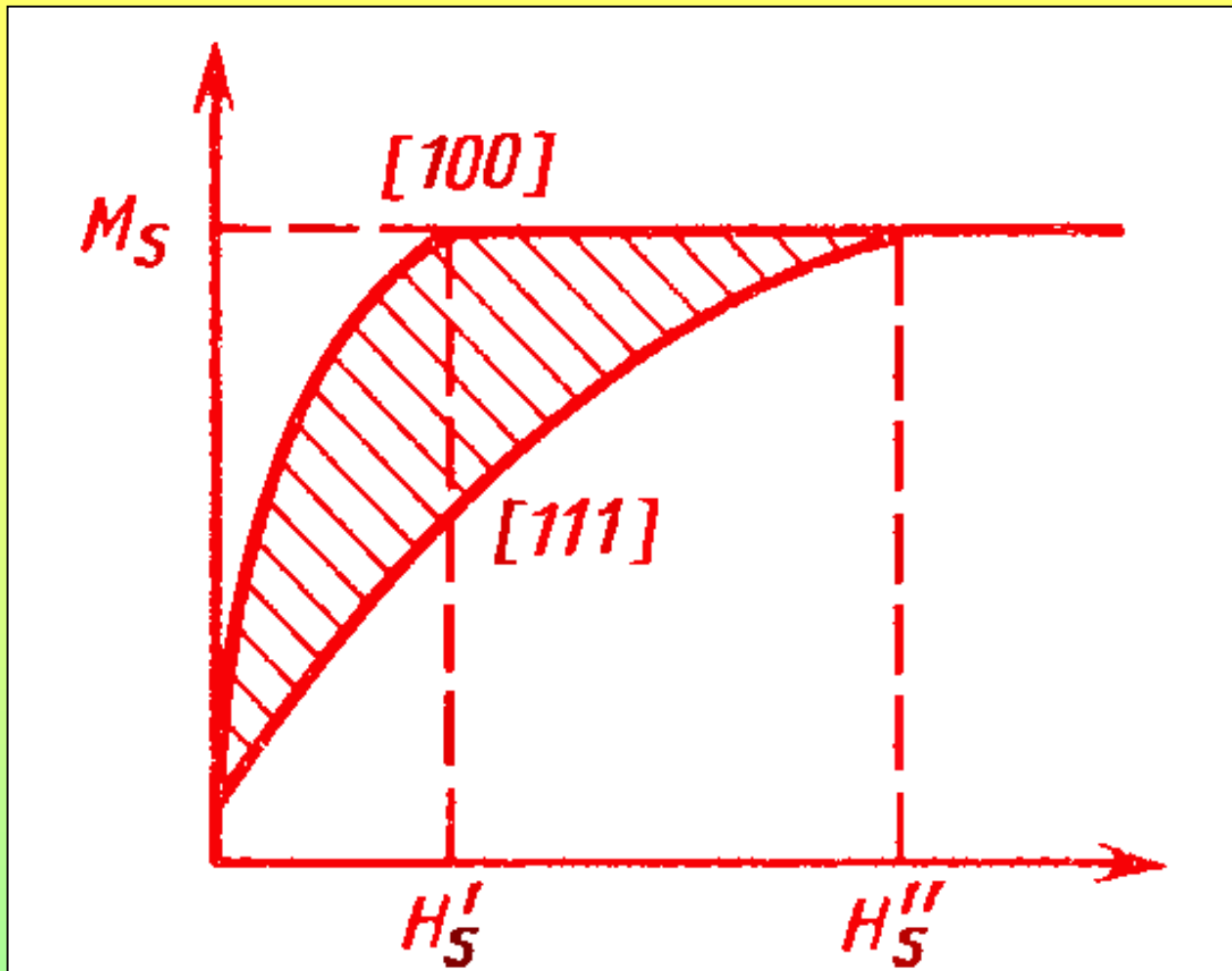


Направления
лёгкого
намагничивания.



Направление
трудного
намагничивания.

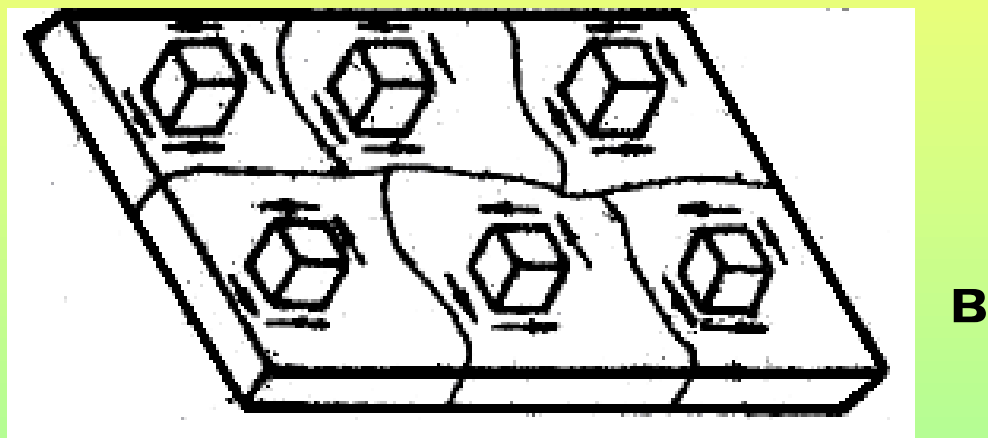
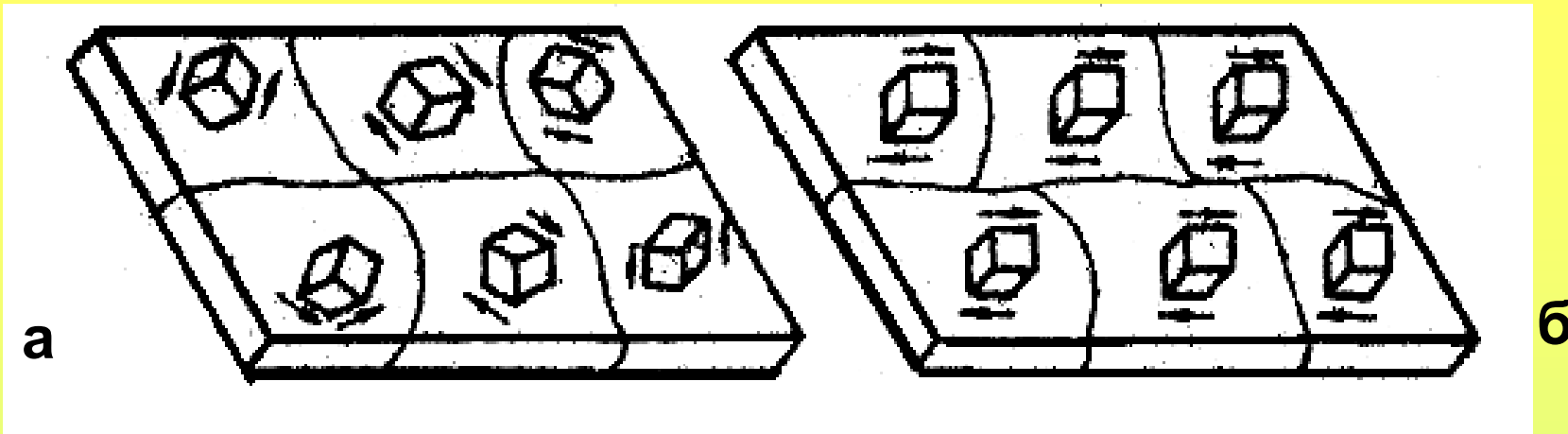




Кривые намагничивания для монокристалла железа. Например, для железа при 20°C

$$K = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$$

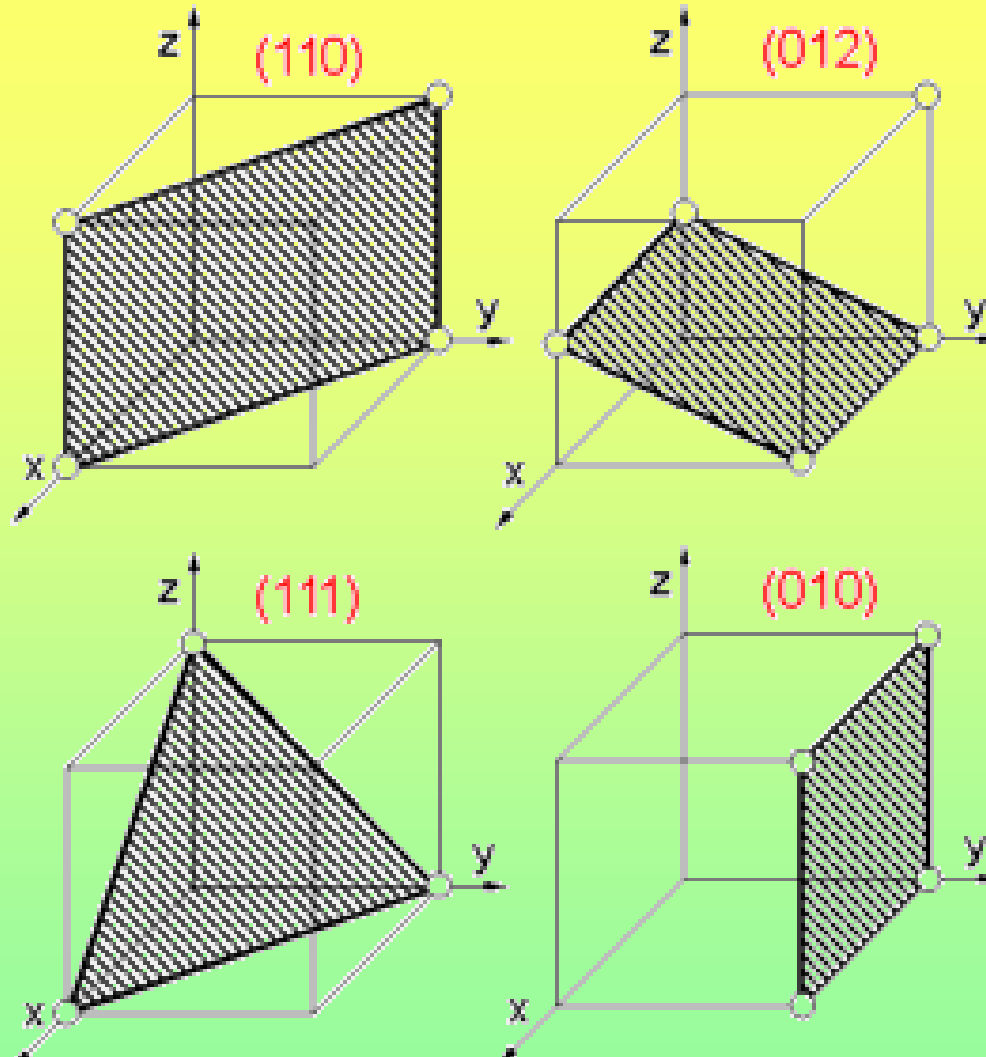




Схематическое изображение **кристаллографической ориентации** в зернах электротехнической стали: а — горячекатаная; б — холоднокатаная с ребровой текстурой; в — холоднокатаная с кубической текстурой.



КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ АТОМНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

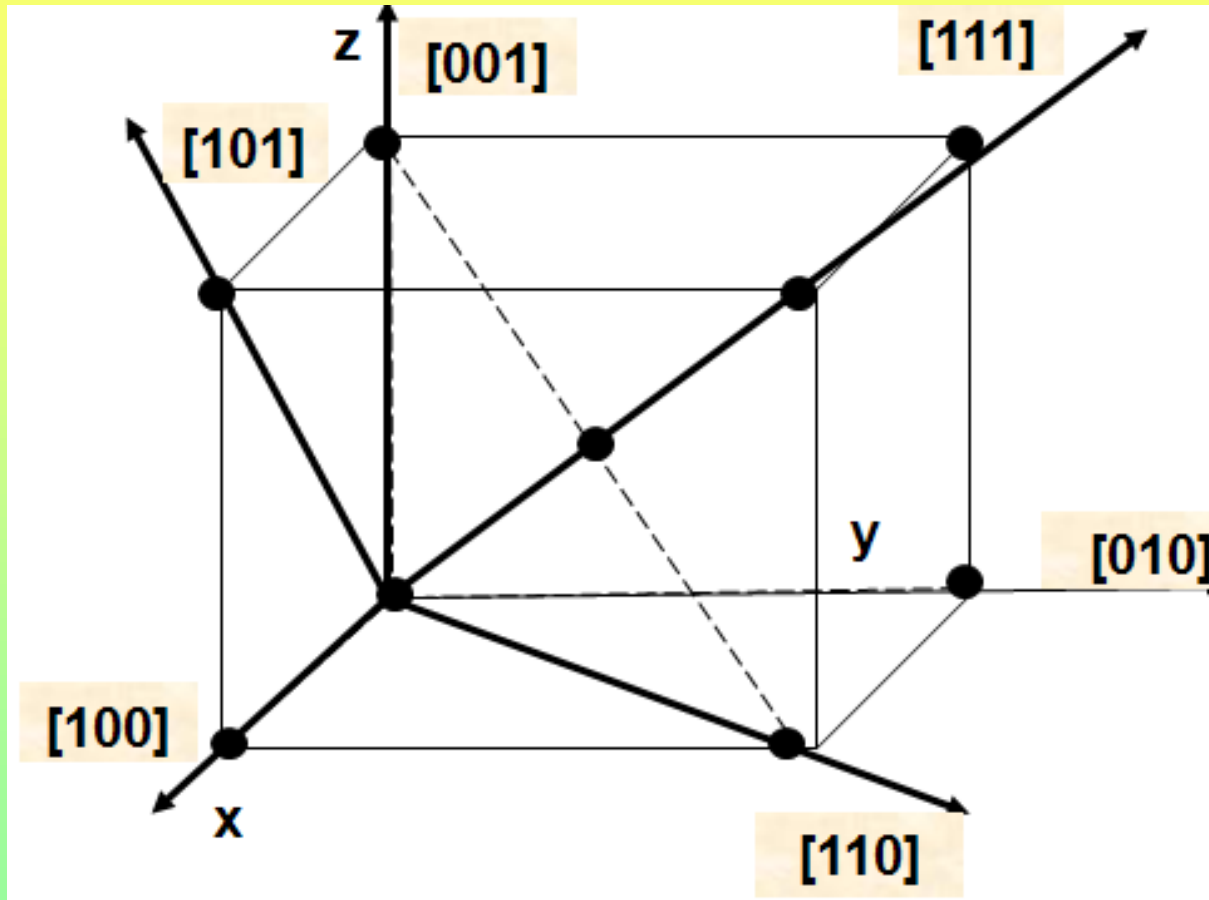


Индексы направлений атомных плоскостей указываются в круглых скобках **(111)**.



ИНДЕКСЫ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ

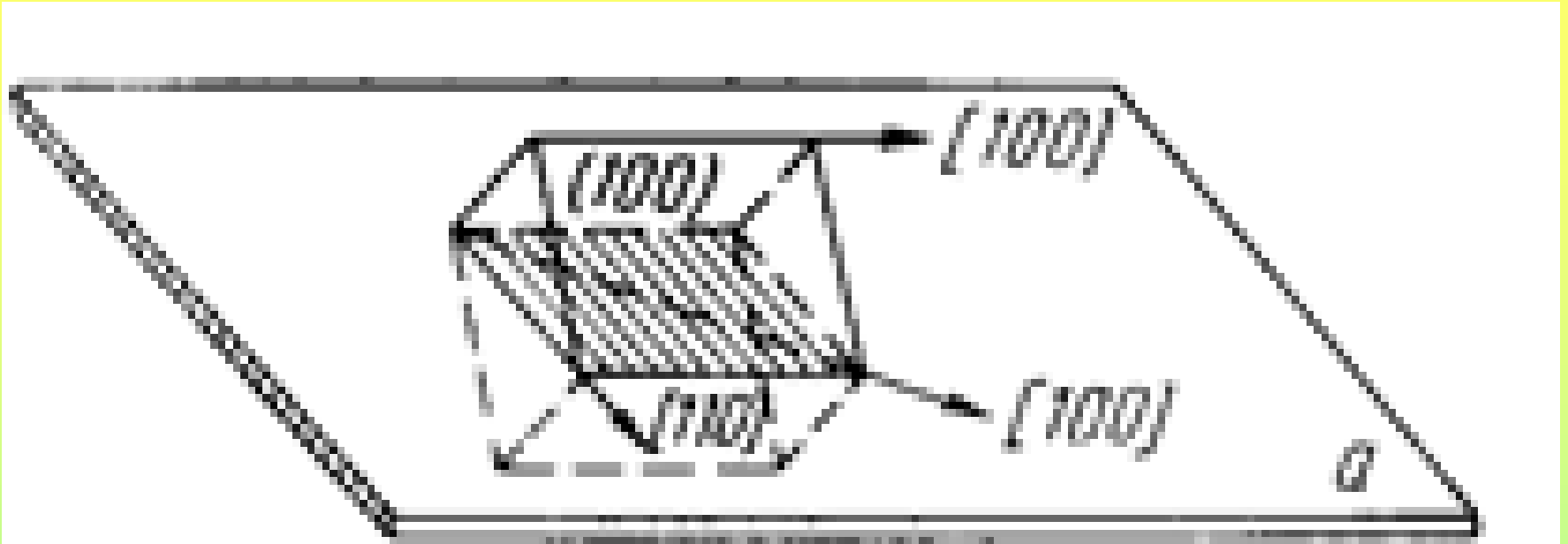
Элементарная кристаллическая ячейка



Индексы направлений указываются в квадратных скобках **[111]**.



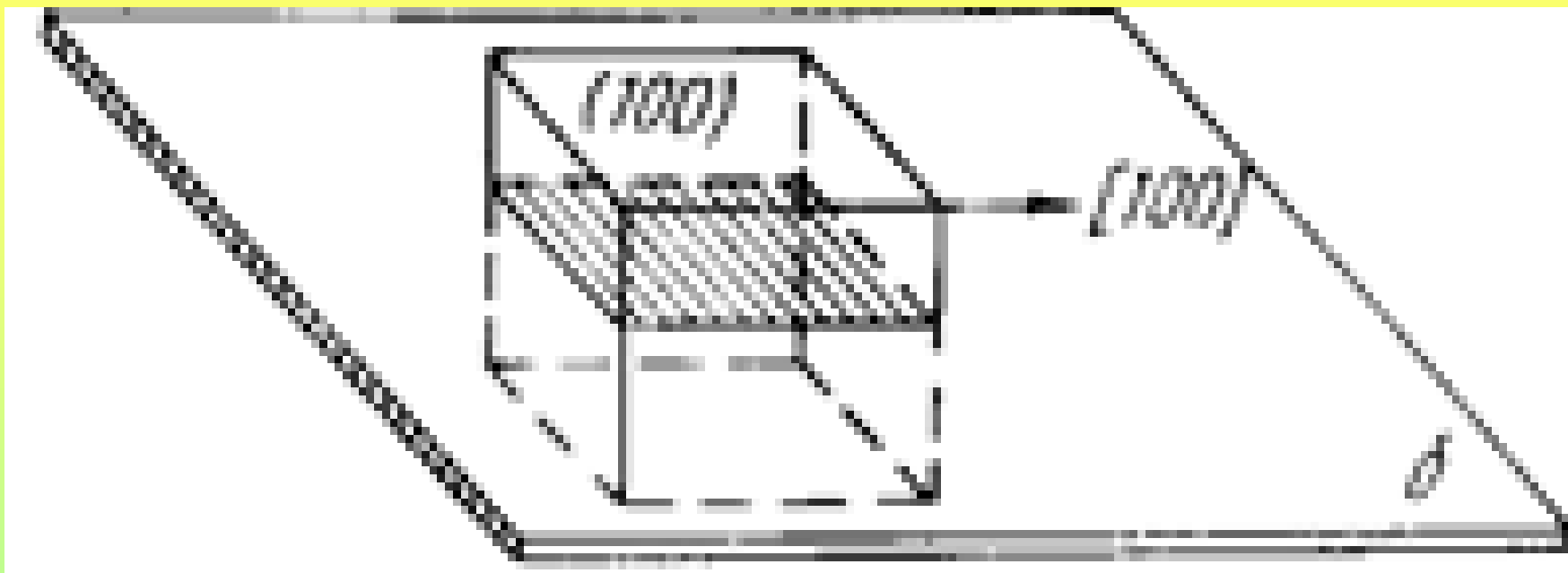
РЕБРОВАЯ ТЕКСТУРА



В **ребровой текстуре** (110) $[100]$ диагональная плоскость куба (110) совпадает с плоскостью прокатки, а направление — ребро куба $[100]$ также совпадает с направлением прокатки.



КУБИЧЕСКАЯ ТЕКСТУРА



В **кубической текстуре** (100) $[100]$ грань куба — плоскость (100) — совпадает с плоскостью прокатки, а ребро куба — направление $[100]$ — совпадает с направлением прокатки.



Контрольные вопросы

1. Что такое коэрцитивная сила?

2. Что такое анизотропия магнитных свойств?

3. Что такое магнитострикция?

4. Что такое индексы кристаллографических направлений ?

5. Что такое ребровая текстура?



12.5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На магнитные свойства магнитных материалов оказывают влияние: химический состав, структура, наличие внутренних напряжений.

Магнитные характеристики и M , B_s , λ_s , K , θ (температура точки Кюри) зависят только от химического состава ферромагнетика.

Характеристики B_r , H_c , μ , H_s являются структурно чувствительными, то есть их свойства зависят от вида термической обработки.

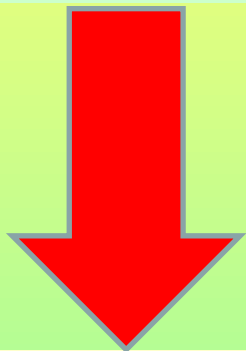
Легко намагничиваются химически чистые ферромагнитные металлы и однофазные сплавы на их основе: у них должно быть минимальное количество примесей, дефектов, наименьший уровень остаточных напряжений, поэтому в конце технологического процесса их подвергают **отжигу**, у них должна быть крупнокристаллическая структура.

Закалкой получают **неравновесную структуру и большие внутренние напряжения**, что приводит к снижению μ и повышению H_c . Отпуск улучшает намагниченность. С увеличением внутренних напряжений магнитная проницаемость уменьшается, а коэрцитивная сила возрастает.



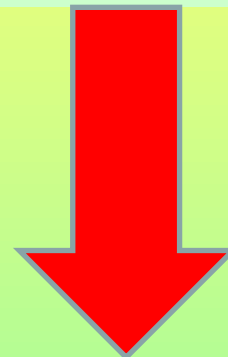
ФАКТОРЫ , КОТОРЫЕ ВЛИЯЮТ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

M , B_s , λ_s , K , θ



**химический
состав
ферромагнетика**

B_r , H_c , μ , H_s



**Термическая
обработка**



ТРЕБОВАНИЯ К ФЕРРОМАГНИТНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Легко намагничиваются чистые ферромагнитные металлы и однофазные сплавы на их основе, которые должны иметь:

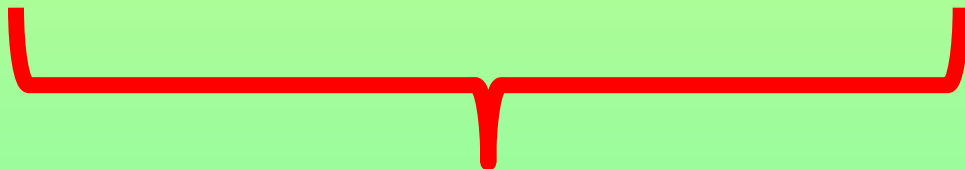


Минимальное количество примесей

Минимальное количество дефектов

Наименьший уровень остаточных напряжений

Крупнокристаллическую структуру



В конце технологического процесса их подвергают **отжигу**

Закалка



неравновесная структура

большие внутренние напряжения



повышение H_c .

снижение μ

Отпуск



снижение H_c .

повышение μ



Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на коэрцитивную силу?

2. Какие факторы влияют на остаточную намагниченность?

2. Как влияет отжиг на магнитные свойства ферромагнетиков?



12.6. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применяемые в электротехнике магнитные материалы подразделяются **по составу**:

- на металлы;
- неметаллы;
- магнито-диэлектрики.

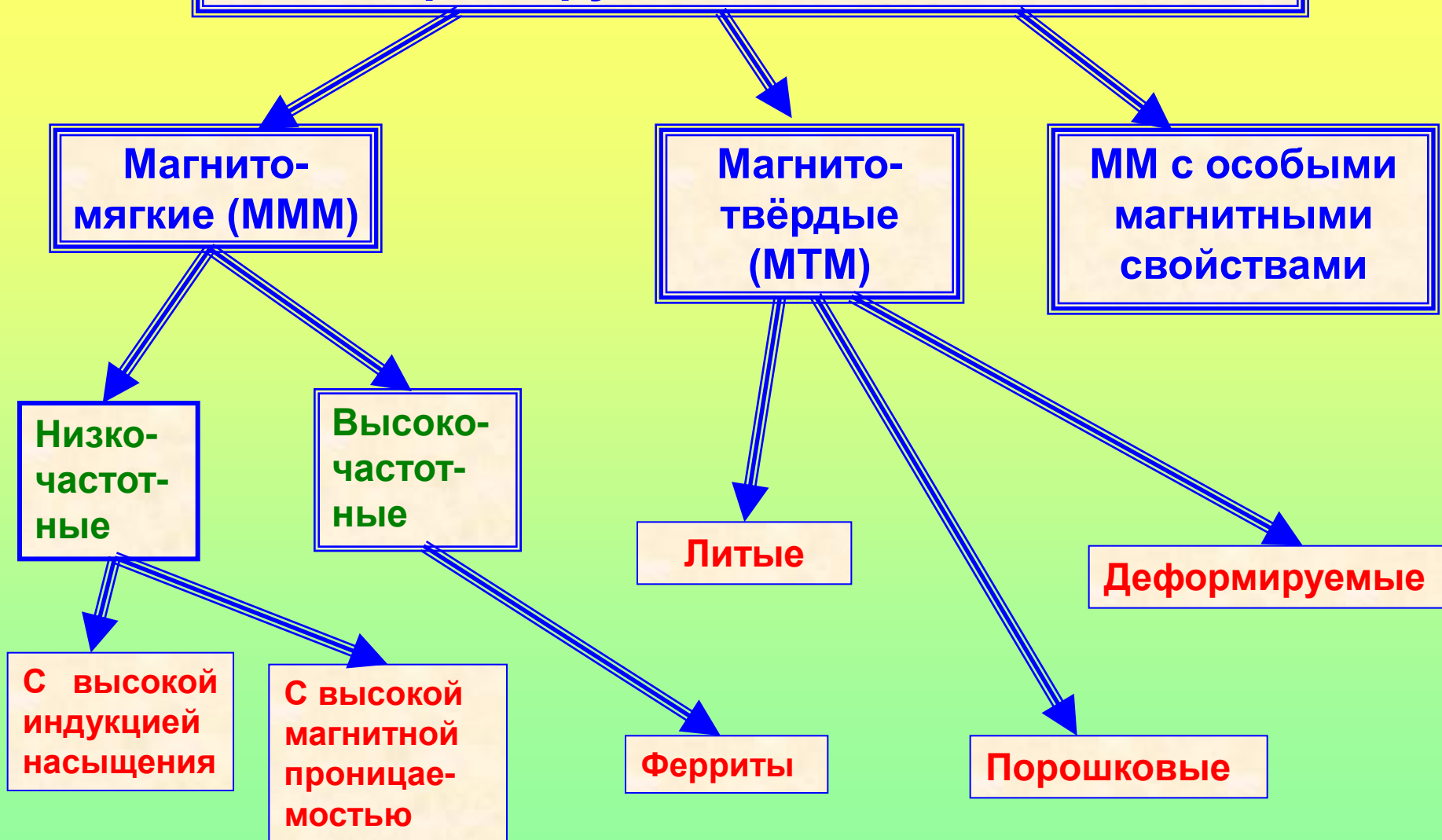


По **характеру магнитных свойств** магнитные материалы делятся на:

- магнитномягкие (МММ);
- магнитнотвердые (ММТ);
- материалы специального назначения.



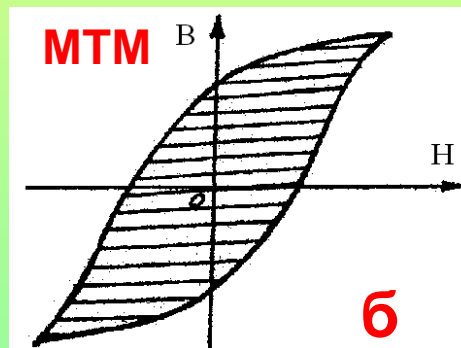
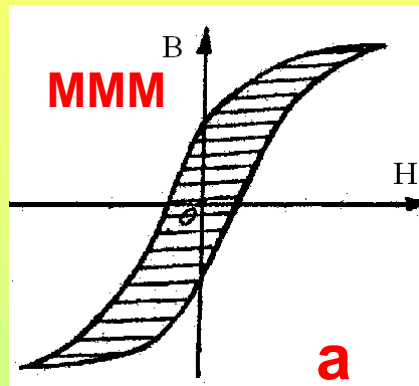
Классификация магнитных материалов по характеру магнитных свойств



КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К **магнитомягким (МММ)** относятся материалы с малой коэрцитивной силой ($H_c < 800 \text{ А/м}$) и высокой магнитной проницаемостью ($\mu < 88 \text{ мГн/м}$).

МММ характеризуются узкой петлей гистерезиса (а) и малыми потерями на перемагничивание. Применяются МММ, в основном, в качестве различных магнитопроводов, сердечников трансформаторов, дросселей, якорей и статоров электромашин, электромагнитов, телефонных мембран.



К **магнитотвердым (МТМ)** относятся материалы с большой H_c ($H_c > 4000 \text{ А/м}$), малой μ и широкой петлей гистерезиса (б). Они перемагничиваются лишь в очень сильных магнитных полях и служат в основном для изготовления постоянных магнитов.

Среди **материалов специального** назначения можно выделить материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); сплавы с большим коэффициентом магнитострикции; термомагнитные сплавы.



Контрольные вопросы

1. В чём причины возникновения магнетизма?

2. Как определяется величина намагниченности?



Задания для самостоятельной работы

1. Изучить физические основы магнетизма.

2. Ознакомиться с процессом намагничивания и размагничивания.

3. Найти применение в промышленности явления магнитострикции.

4. Найти применение в промышленности явления анизотропии магнитных свойств.

3. Объяснить требования к магнитным материалам, которые должны трудно перемагничиваться.





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: lalaz1991@mail.ru

**г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М
Tel.(8-057)707-37-92**