

FERROMAGNETIKLAR. MAGNITLANISH JARAYONI, GISTEREZIS, QOLDIQ MAGNITLANISH, KOERSITIV KUCH VA DOMENLAR NAZARIYASI

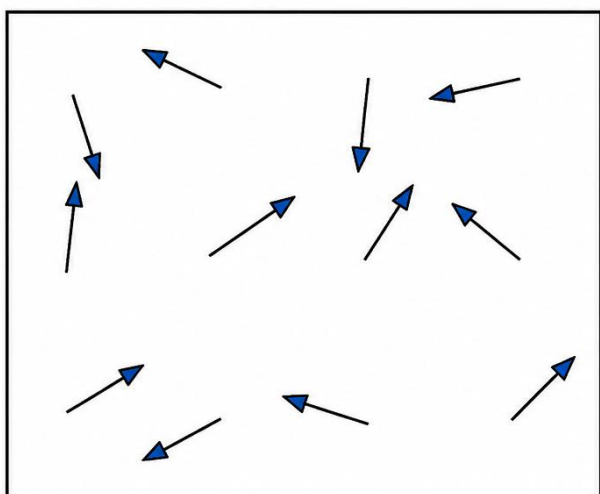
Ferromagnetizm - ayrim qattiq jismlarda atom magnit momentlarining almashinuv o'zaro ta'siri natijasida uzoq masofali tartiblanishi bilan bog'liq kuchli magnit hodisadir. Temir, kobalt, nikel va ko'plab qotishmalarda tashqi magnit maydon bo'lmaganda ham mikroskopik sohalar - domenlar ichida spontan magnitlanish mavjud bo'lishi mumkin. Tashqi H maydon domenlar chegaralarini siljitadi va magnit momentlarni maydon bo'ylab buradi; natijada modda kuchli magnitlanadi.

Darsning maqsadi

Ferromagnetiklarning magnitlanish mexanizmini domenlar nazariyasi asosida tushuntirish; boshlang'ich magnitlanish egri chizig'i va gisterezis sirtmog'ini tahlil qilish; qoldiq magnit induksiya yoki magnitlanish, koersitiv maydon, to'yinish va gisterezis yo'qotishlarining fizik mazmunini formulalar, grafiklar, jadvallar hamda hisoblash misollari orqali ochib berish.

Magnitlanmagan holat

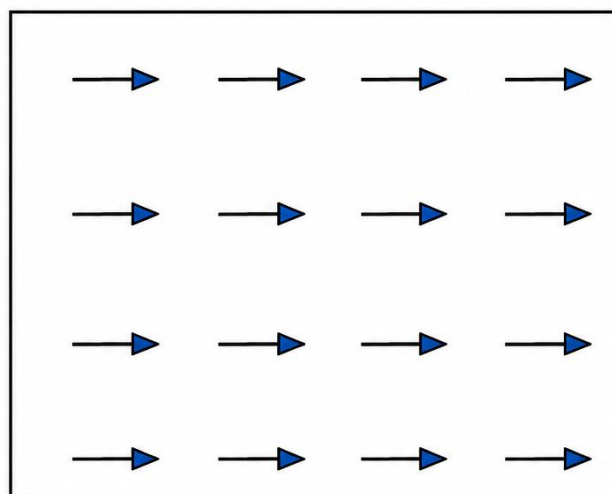
(tashqi magnit maydon yo'q, $H = 0$)



Magnit momentlar tartibsiz yo'nalgan, natijaviy magnitlanish $M \neq 0$.

Tashqi maydonda magnitlanish

(tashqi magnit maydon mavjud, $H \neq 0$)



Magnit momentlar maydon yo'nalishiga qarab tartiblanadi, $M \neq 0$.

→ H

1-rasm. Ferromagnetik domenlarning magnitlanishdan oldingi va tashqi maydondagi holati

Kattalik	Belgi	SI birligi
Magnit maydon kuchlanganligi	H	A/m
Magnit induksiya	B	T
Magnitlanish	M	A/m

Qoldiq induksiya	B_r	T
Koersitiv maydon	H_c	A/m
To'yinish magnitlanishi	M_s	A/m

1. Ferromagnetizmning fizik mohiyati

Ferromagnetiklarda qo'shni atomlarning spin magnet momentlari kvant-mexanik almashinuv o'zaro ta'siri tufayli parallel tartiblanishga moyil bo'ladi. Bu hodisani faqat klassik orbital toklar modeli bilan to'liq tushuntirib bo'lmaydi. Almashinuv energiyasi elektron to'lqin funksiyalarining simmetriyasi va Pauli prinsipiga bog'liq bo'lib, ma'lum materiallarda parallel spin holatini energetik jihatdan qulay qiladi.

Makroskopik magnet induksiya:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

Ferromagnetikda M ning H ga bog'lanishi odatda kuchli noxiziqli va tarixga bog'liq. Shu sababli oddiy $M = \chi H$ munosabati faqat cheklangan sohada lokal yaqinlashuv sifatida ishlatiladi.

Domen ichida spontan magnetlanish M_s ga yaqin bo'lishi mumkin, biroq magnetlanmagan namunaning turli domenlari har xil yo'nalganligi sababli ularning vektor yig'indisi deyarli nol bo'ladi.

1-misol

Agar namuna ichida $H = 2.0 \times 10^4$ A/m va $M = 8.0 \times 10^5$ A/m bo'lsa, $B = \mu_0(H + M) \approx 1.03$ T. Bu natija ferromagnetikda M hissasi H hissidan ancha katta bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi.

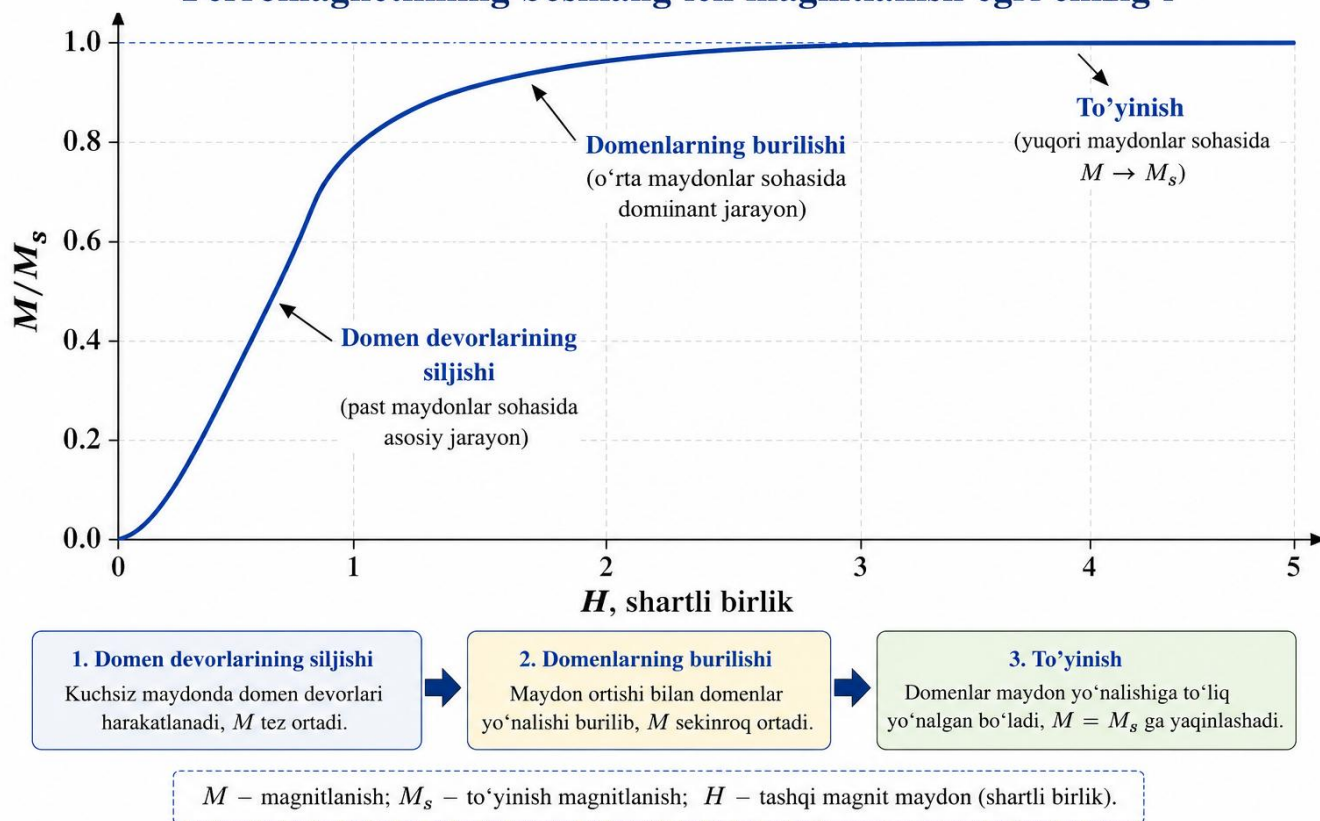
Energetik omillar

Domen tuzilishi almashinuv energiyasi, kristall magnet anizotropiya energiyasi, domen devori energiyasi, magnetostatik energiya va mexanik kuchlanishlar o'rtasidagi muvozanat natijasida shakllanadi.

2. Ferromagnetiklarning magnetlanish jarayoni

Dastlabki magnetlanish jarayoni bir necha bosqichda kechadi. Kuchsiz H da maydon yo'nalishiga yaqin domenlar hajmi domen devorlarining qaytar siljishi hisobiga ortadi. Maydon kuchayganda devorlar nuqsonlar va kristall panjara to'siqlaridan o'tib, qaytmas siljishlar sodir bo'ladi. Yanada kuchli maydonda magnet momentlar oson magnetlanish o'qlaridan H yo'nalishiga buriladi va nihoyat magnet to'yinishga yaqinlashadi.

Ferromagnetikning boshlang'ich magnetlanish egri chizig'i



2-rasm. Boshlang'ich magnetlanish egri chizig'i va magnetlanish mexanizmlarining ketma-ketligi

Differensial magnet qabul qiluvchanlik va differensial singdiruvchanlik egri chiziqning lokal qiyaligini ifodalaydi:

$$\chi_{\text{diff}} = dM/dH$$

$$\mu_{\text{diff}} = dB/dH$$

To'yinish yaqinida dM/dH kichrayadi, chunki domenlarning katta qismi maydon bo'ylab yo'nalgan bo'ladi.

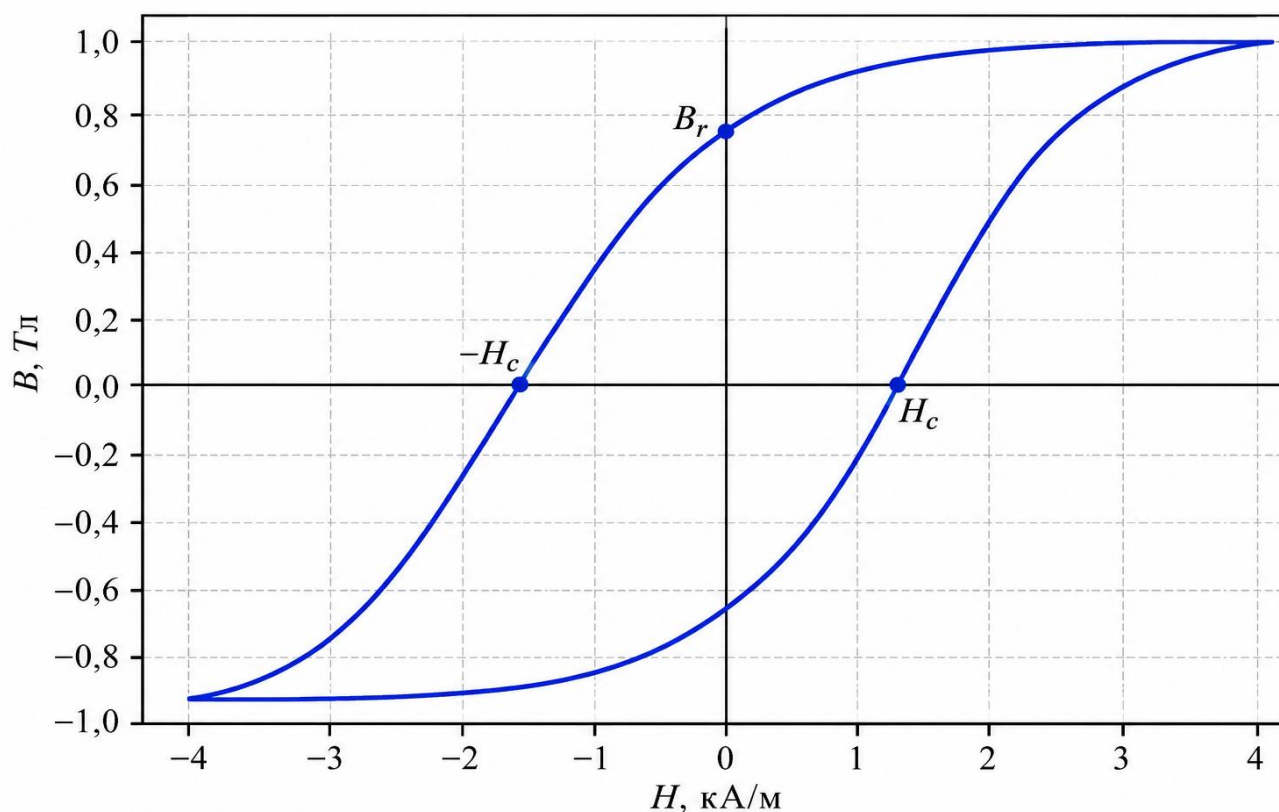
2-misol

Magnetlanish egri chizig'ining bir qismida H 100 A/m ga oshganda M 2.5×10^4 A/m ga oshgan bo'lsa, o'rtacha differensial qabul qiluvchanlik $\Delta M/\Delta H \approx 250$.

3. Gisterezis sirtmog'i

Ferromagnetik magnetlanishi tashqi maydonning faqat joriy qiymatiga emas, uning oldingi tarixiga ham bog'liq. H ni musbat to'yinishdan kamaytirib, nol orqali manfiy qiymatlarga va yana musbat tomonga o'zgartirilganda yopiq $B(H)$ yoki $M(H)$ egri chizig'i - gisterezis sirtmog'i hosil bo'ladi.

Ferromagnetik uchun gisterezis sirtmog'i (sxematik)



3-rasm. Gisterezis sirtmog'i: qoldiq magnitlanish va koersitiv maydonning grafik talqini

$H=0$ ga qaytganda B yoki M nol bo'lmaydi. $B(H)$ sirtmog'ida qolgan B qiymati qoldiq magnit induksiya B_r deyiladi. $M(H)$ tasvirida mos ravishda qoldiq magnitlanish M_r ishlatiladi. Magnit holatni nolga yaqinlashtirish uchun teskari yo'nalishda ma'lum H maydon berish kerak; uning moduliga koersitiv maydon H_c deyiladi.

$$H = 0 \rightarrow B = B_r \text{ (yoki } M = M_r)$$

$$B = 0 \rightarrow H = -H_c \text{ [B-H sirtmog'i uchun]}$$

Koersitivlik materialning magnit holatni saqlash qobiliyati va domen devorlarining harakatiga qarshilik bilan bog'liq.

4. Qoldiq magnitlanish va koersitiv kuch

Qoldiq magnitlanish doimiy magnitlar yaratishda muhim: tashqi magnitlovchi maydon olib tashlangandan keyin ham sezilarli magnit holat saqlanadi. Koersitiv maydon esa bu holatni yo'qotish uchun zarur bo'lgan qarama-qarshi maydon miqyosini belgilaydi. Amaliy adabiyotlarda 'koersitiv kuch' iborasi ishlatilsa-da, SI nuqtai nazaridan u kuch emas, magnit maydon kuchlanganligi bo'lib A/m da o'lchanadi.

Parametr	Fizik mazmun	Amaliy ahamiyat
B_r yoki M_r	$H=0$ dagi saqlanib qolgan magnit holat	Doimiy magnitning qoldiq maydoni
H_c	Magnit holatni nolga keltiruvchi teskari maydon	Magnit barqarorlik
M_s	Kuchli maydondagi to'yinish magnitlanishi	Maksimal magnit javob

Sirtmoq yuzi	Bir sikldagi energiya yo'qotishiga bog'liq	Transformator va motor samaradorligi
--------------	--	--------------------------------------

3-misol

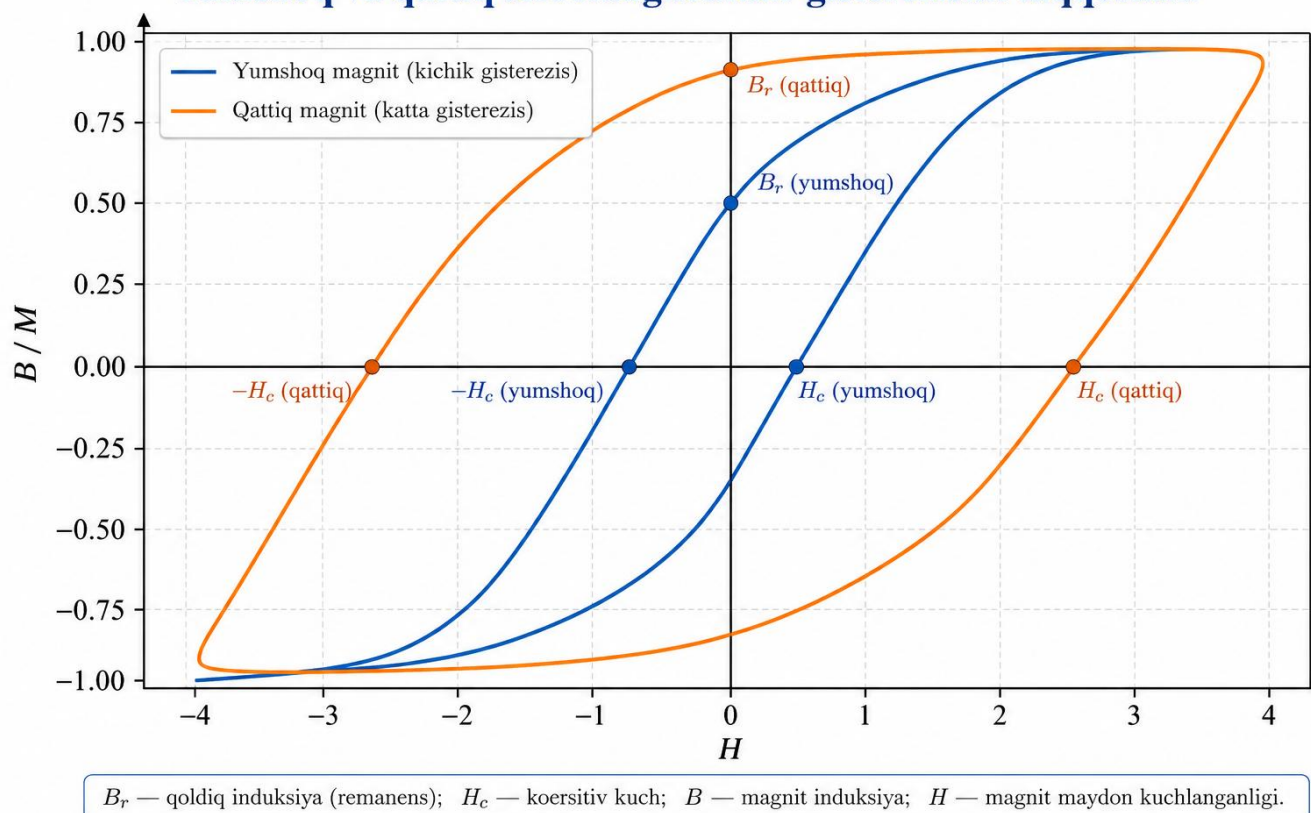
B-H sirtmog'ida $H=0$ da $B=0.85$ T bo'lsa, qoldiq induksiya $B_r=0.85$ T. $B=0$ bo'lishi uchun $H=-4.0 \times 10^4$ A/m kerak bo'lsa, $H_c=4.0 \times 10^4$ A/m.

4-misol

Ikki materialdan A uchun $H_c=80$ A/m, B uchun $H_c=6 \times 10^4$ A/m bo'lsa, A magnit jihatdan yumshoq, B esa qattiq material sifatida qaraladi.

5. Yumshoq va qattiq ferromagnetiklar

Yumshoq va qattiq ferromagnetiklar gisterezisini taqqoslash



4-rasm. Magnit jihatdan yumshoq va qattiq materiallarning gisterezis sirtmoqlari

Yumshoq magnit materiallarda H_c kichik va gisterezis sirtmog'i tor bo'ladi. Ular oson magnitlanib, oson demagnitlanadi; transformator o'zaklari, elektromagnitlar va elektr mashinalarida energiya yo'qotishini kamaytirish uchun qo'llanadi. Qattiq magnit materiallarda H_c va ko'pincha qoldiq magnitlanish katta bo'lib, ular doimiy magnitlar uchun qulay.

Bir magnitlanish siklida birlik hajmga to'g'ri keladigan gisterezis energiya yo'qotishi B-H diagrammasida:

$$w_h = \oint H dB$$

Geometrik jihatdan bu B-H sirtmog'ining yuziga teng. Chastotasi f bo'lgan takroriy sikllarda gisterezis quvvat yo'qotishi taxminan $P_h = f V w_h$.

5-misol

Agar sirtmoq yuziga mos energiya yo'qotishi $w_h=120 \text{ J/m}^3$ va o'zak hajmi $V=2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ bo'lsa, bir sikldagi yo'qotish $W=0.024 \text{ J}$. $f=50 \text{ Hz}$ da faqat gisterezis hisssasi $P \approx 1.2 \text{ W}$.

6. Domenlar nazariyasi

Domen - ferromagnetik kristallning spontan magnitlanish vektori deyarli bir xil yo'nalgan mikroskopik yoki mezoskopik sohasi. Qo'shni domenlar orasida magnitlanish yo'nalishi keskin sakramasdan, ma'lum qalinlikdagi domen devori orqali asta-sekin buriladi. Domenlarning paydo bo'lishi tashqi magnitostatik energiyani kamaytiradi, lekin domen devorlari yaratish energiya talab qiladi; muvozanat domen o'lchami va konfiguratsiyasini belgilaydi.

Tashqi maydon berilganda maydonga qulay yo'nalgan domenlar o'sadi. Kristall nuqsonlari, donalar chegaralari, dislokatsiyalar va ichki kuchlanishlar domen devorlarini 'mahkamlab' turishi mumkin. Shu pinning hodisasi qaytmas magnitlanish va gisterezisning muhim mikroskopik sababidir.

Domen nazariyasi qoldiq magnitlanishni ham izohlaydi: H olib tashlangach, domen devorlari boshlang'ich holatga to'liq qaytmaydi va momentlarning natijaviy yo'nalishi saqlanib qoladi.

6-misol

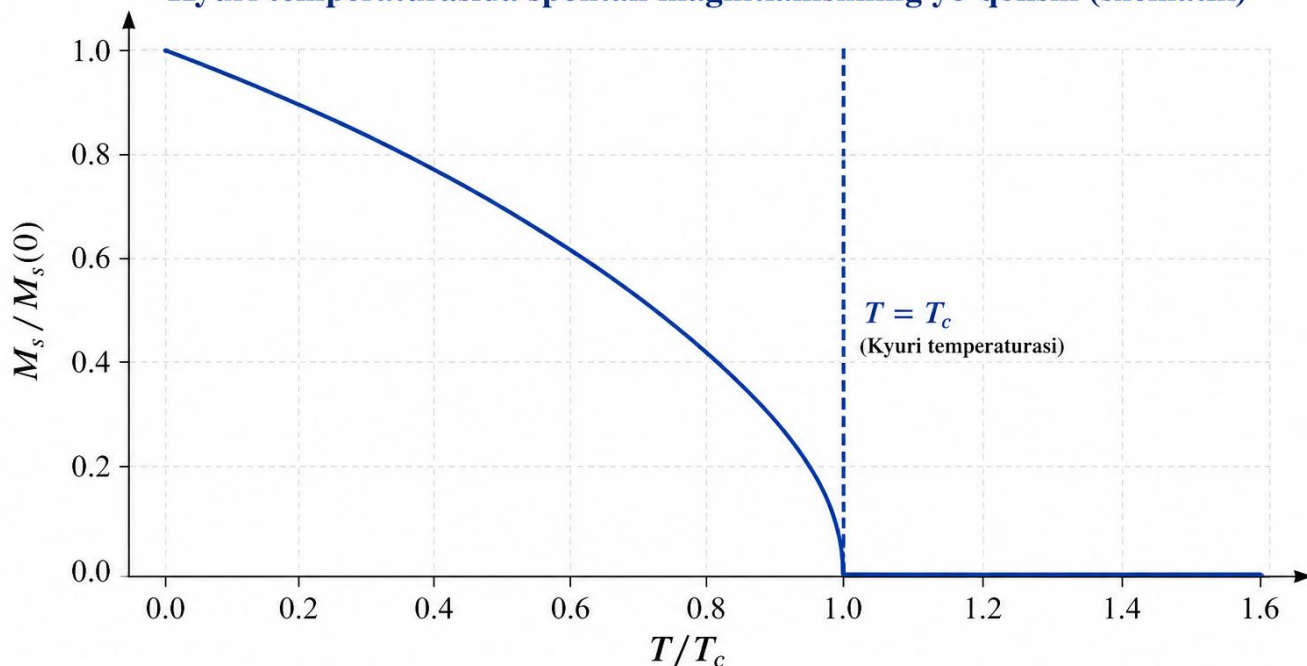
Namunaning 60% hajmida magnitlanish $+x$ yo'nalishda M_s , 40% hajmida $-x$ yo'nalishda M_s bo'lsa, sodda ikki-domen modelida $M=(0.60-0.40)M_s=0.20M_s$.

Jarayon	Domen darajasidagi mexanizm
Kuchsiz maydon	Domen devorlarining qaytar siljishi
O'rta maydon	Devorlarning pinning to'siqlaridan qaytmas o'tishi
Kuchli maydon	Magnit momentlarning H tomon burilishi
To'yinish	Domen momentlarining deyarli to'liq moslashuvi

7. Kyuri temperaturasi va ferromagnetizmning yo'qolishi

Temperatura ortishi spinlarning issiqlik tartibsizligini kuchaytiradi. Ma'lum kritik temperatura - Kyuri temperaturasi T_C dan yuqorida uzoq masofali ferromagnit tartib buziladi va modda odatda paramagnit holatga o'tadi. T_C materialga xos kattalikdir.

Kyuri temperaturasiida spontan magnetlanishning yo'qolishi (sxematik)



$T < T_c$ (ferromagnit faza): $M_s > 0$
Spontan magnetlanish mavjud va T oshishi bilan kamayadi.

$T \geq T_c$ (paramagnit faza): $M_s = 0$
Spontan magnetlanish yo'qoladi.

M_s — spontan magnetlanish; $M_s(0)$ — $T = 0$ K dagi spontan magnetlanish; T_c — Kyuri temperaturasi.

5-rasm. Kyuri temperaturasi yaqinida spontan magnetlanishning kamayishi (sxematik)

T_C dan yuqorida ko'plab ferromagnetiklarning paramagnit qabul qiluvchanligi Kyuri-Veys qonuniga yaqin tarzda ifodalanadi:

$$\chi = C/(T - \theta)$$

Oddiy o'rtacha maydon modelida θ qiymati T_C ga yaqin bo'lishi mumkin. $T < T_C$ sohada spontan magnetlanish mavjud; real kritik xulq material va o'zaro ta'sir modeliga bog'liq.

7-misol

Paramagnit sohada $C=0.80$ K va $\theta=500$ K bo'lgan model uchun $T=600$ K da $\chi=0.80/(600-500)=8.0 \times 10^{-3}$.

8-misol

Agar qurilma ferromagnit o'zakning T_C qiymatidan yuqori temperaturada ishlasa, yuqori singdiruvchanlik va domenli ferromagnit tartib keskin susayishi mumkin. Shu sababli magnit material tanlashda ish temperaturasi muhim muhandislik mezonidir.

8. Darsni tashkil etish metodikasi va tahlil

Bosqich	Darsdagi faoliyat
1	Temirning tashqi maydonsiz ham kuchli magnetlanib qolishi haqidagi muammoli savol bilan kirish.
2	$B=\mu_0(H+M)$ orqali ferromagnetikda M hissasining katta ekanini tushuntirish.

3	Domen modeli yordamida magnitlanmagan va magnitlangan holatlarni vizual taqqoslash.
4	Boshlang'ich $M(H)$ egri chizig'ida devor siljishi, burilish va to'yinish bosqichlarini tahlil qilish.
5	Gisterezis sirtmog'idan B_r/M_r va H_c ni grafik usulda aniqlash.
6	Yumshoq va qattiq magnit materiallarni sirtmoq kengligi va qo'llanishi bo'yicha qiyoslash.
7	$\oint H dB$ orqali gisterezis energiya yo'qotishini tushuntirish.
8	Kyuri temperaturasi orqali ferromagnit tartibning termik buzilishini umumlashtirish.

Muammoli savollar

Nima uchun magnitlanmagan ferromagnetikda domenlar mavjud bo'lsa ham umumiy M kichik? Gisterezis nima sababdan 'xotira' hodisasi hisoblanadi? Qoldiq magnitlanish bilan koersitiv maydonning farqi nimada? Nima uchun transformator o'zagi uchun tor, doimiy magnit uchun keng sirtmoq afzal? Domen devorlarini kristall nuqsonlari qanday qilib gisterezis bilan bog'laydi? T_C dan yuqorida ferromagnetizm nima sababdan yo'qoladi?

Ko'p uchraydigan xatolar

Koersitiv kuchni Nyutonda o'lchanadigan mexanik kuch deb qabul qilish; B_r va M_r ni bir xil birlikdagi aynan bir kattalik deb hisoblash; gisterezis sirtmog'i yuzini har doim $M-H$ diagrammasida bevosita J/m^3 deb olish; ferromagnetik uchun μ va χ ni barcha H da o'zgarmas deb qabul qilish; domenlarni alohida molekulalar deb talqin qilish; Kyuri temperaturasini materialning erish temperaturasi bilan aralashtirish.

9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va yakuniy xulosa

Formula / belgi	Mazmuni
$B = \mu_0(H + M)$	Muhitdagi magnit induksiya
$\chi_{diff} = dM/dH$	Differensial magnit qabul qiluvchanlik
$\mu_{diff} = dB/dH$	Differensial magnit singdiruvchanlik
M_s	To'yinish magnitlanishi
B_r yoki M_r	Qoldiq magnit holat
H_c	Koersitiv maydon
$w_h = \oint H dB$	Bir sikldagi gisterezis yo'qotishi / hajm
$\chi = C/(T - \theta)$	Kyuri-Veys qonuni, paramagnit soha

Mustaqil topshiriqlar

- $H = 3 \times 10^4$ A/m va $M = 9 \times 10^5$ A/m bo'lsa, B ni hisoblang.
- $M = 1.2 \times 10^5$ A/m ga o'zgarganda $H = 400$ A/m ga o'zgarsa, o'rtacha χ_{diff} ni toping.

3. B-H sirtmog'idan $B_r=1.1$ T va $H_c=7 \times 10^4$ A/m bo'lgan materialning yumshoq yoki qattiq magnit sifatidagi xususiyatini izohlang.
4. $w_h=80$ J/m³, $V=5 \times 10^{-4}$ m³ va $f=60$ Hz bo'lsa, gisterezis quvvat yo'qotishini toping.
5. Domen devorlarining pinning hodisasi qoldiq magnitlanish va koersitivlikka qanday ta'sir qilishini izohlang.
6. Ferromagnetikning $T < T_C$ va $T > T_C$ holatlarini magnit tartib nuqtai nazaridan taqqoslang.

Yakuniy xulosa

Ferromagnetizm kvant-mexanik almashinuv o'zaro ta'siri natijasida atom magnit momentlarining kollektiv tartiblanishi bilan yuzaga keladi. Real ferromagnetik namuna domenlardan tuzilgan bo'lib, tashqi maydon ta'sirida domen devorlarining siljishi va momentlarning burilishi orqali magnitlanadi. Magnitlanish tarixga bog'liq bo'lgani sababli gisterezis sirtmog'i hosil bo'ladi. $H=0$ dagi qoldiq B_r yoki M_r magnit xotirani, H_c esa magnit holatni yo'qotish uchun zarur teskari maydonni tavsiflaydi. Tor gisterezisli yumshoq materiallar o'zgaruvchan maydonli qurilmalarda, keng sirtmoqli qattiq materiallar doimiy magnitlarda qo'llanadi. Kyuri temperaturasidan yuqorida termik tartibsizlik uzoq masofali ferromagnit tartibni buzadi.

Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Wiley.
2. Cullity B. D., Graham C. D. Introduction to Magnetic Materials. Wiley-IEEE Press.
3. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press.
4. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.