

В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ
АТЛАС
ПО ФИЗИКЕ



ЭКЗАМЕН

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ И ЛУНЫ

Тело Солнечной системы	♀ МЕРКУРИЙ MERCURY	♀ ВЕНЕРА VENUS	⊕ ЗЕМЛЯ EARTH	♂ МАРС MARS	☾ ЛУНА LUNA
Фотография					
Масса (в массах Земли, $m_{\oplus}$)	0,06	0,82	1,0 $m_{\oplus} = 6 \cdot 10^{24}$ кг	0,11	0,012
Радиус (в радиусах Земли, $R_{\oplus}$)	0,38	0,95	1,0 $R_{\oplus} = 6378$ км	0,53	0,27
Средняя плотность, 10^3 кг/м ³	5,43	5,24	5,52	3,93	3,34
Среднее расстояние от Солнца, а.е.	0,387	0,723	1,00	1,52	-
Среднее расстояние от Солнца, млн. км	58	108	150	228	-
Звездный период обращения вокруг Солнца, годы	0,241 (87,9 д)	0,615 (225 д)	1,00	1,881	-
Средняя орбитальная скорость, км/с	47,9	35,0	29,79	24,1	1,02
Звездный период вращения вокруг оси	58,6 д	243 д	23,93 ч	24,6 ч	27,3 д
g , м/с ²	3,7	8,9	9,8	3,7	1,67
v_{II} , км/с	4,2	10,4	11,2	5,0	2,38
*Температура поверхности, К	700 (днем) 100 (ночью)	740	290	240	400 (днем) 100 (ночью)
Наклон оси плоскости орбиты	90°	- 87°	66,5°	65°	83,3°
Число спутников (на 2008 г.)	0	0	1	2	-
Состав атмосферы	Практически отсутствует ($p \approx 10^{-14}$ атм)	CO ₂ (96%) N ₂ (3,5%)	N ₂ (77%) O ₂ (21%) Ar (1%)	CO ₂ (95%) N ₂ (2,7%) Ar (1,6%)	Практически отсутствует ($p \approx 10^{-14}$ атм)

В.А. Касьянов

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ

АТЛАС

по ФИЗИКЕ

*Рекомендовано
Российской Академией
Образования*



**Издательство
ЭКЗАМЕН
Москва**

УДК 373:53(083.4)

ББК 22.3я72

К28

Касьянов, В.А.

К28 Иллюстрированный Атлас по физике: 11 класс / В.А. Касьянов. — М.: Издательство «Эк-
замен», 2010. — 191, [1] с.

ISBN 978-5-377-02835-2

«Иллюстрированный Атлас по физике» — уникальное учебное пособие, не имеющее аналогов в мировой и отечественной учебной литературе, сочетающее достоинства интересного, доказательного учебника и красочного альбома наглядных иллюстраций, помогающих глубже понять суть физических явлений и легче запомнить их взаимосвязи.

«Иллюстрированный Атлас по физике» может использоваться как основное учебное пособие для изучения физики на базовом уровне. Простота и лаконичность изложения курса физики 10–11 классов делает «Иллюстрированный Атлас по физике» незаменимым при подготовке к контрольным работам, экзаменам и ЕГЭ.

«Иллюстрированный Атлас по физике. 11 класс» содержит следующие разделы: Электродинамика (постоянный ток, магнитное поле, электромагнетизм), Электромагнитное излучение (излучение радио- и СВЧ-диапазона, геометрическая и волновая оптика, квантовая теория излучения), Физика высоких энергий (физика атомного ядра, элементарные частицы), Эволюция Вселенной.

УДК 373:53(083.4)

ББК 22.3я72

Формат 60х90/8. Гарнитура «Школьная». Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 7,68.

Усл. печ. л. 24. Тираж 10 000 экз. Заказ № 16927.

ISBN 978-5-377-02835-2

© Касьянов В.А., 2010

© Издательство «ЭКЗАМЕН», 2010

Введение.....	5
---------------	---

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 1. Постоянный электрический ток

§1. Электрический ток. Сила тока	6
§2. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи). Сопротивление.....	8
§3. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры	10
§4. Электрический ток в полупроводнике	12
§5. Электрический ток в вакууме и газах	14
§6. Соединение проводников.....	16
§7. ЭДС. Закон Ома для замкнутой цепи.....	18
§8. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля-Ленца	20

Глава 2. Магнитное поле

§9. Магнитное взаимодействие.....	22
§10. Магнитное поле электрического тока.....	24
§11. Линии магнитной индукции	26
§12. Действие магнитного поля на проводник с током.....	28
§13. Рамка с током в однородном магнитном поле	30
§14. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы	32
§15. Масс-спектрограф. Циклотрон	34
§16. Пространственные траектории заряженных частиц в магнитном поле.....	36
§17. Взаимодействие электрических токов	38
§18. Магнитный поток. Энергия магнитного поля тока.....	40
§19. Магнитное поле в веществе. Диа- и парамагнетизм	42
§20. Ферромагнетики	44

Глава 3. Электромагнетизм

§21. ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле	46
§22. Опыты Фарадея с катушками	48
§23. Опыты Генри	50
§24. Трансформатор. Электромагнитная индукция в современной технике	52
§25. Передача и распределение электроэнергии	54

Глава 4. Цепи переменного тока

§26. Векторные диаграммы для описания переменных токов и напряжений	56
§27. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности в цепи переменного тока	58
§28. Свободные гармонические электромагнитные колебания в колебательном контуре.....	60
§29. Колебательный контур в цепи переменного тока	62
§30. Полупроводниковый диод.....	64
§31. Транзистор	66

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Глава 5. Излучение и прием электромагнитных волн радио- и СВЧ-диапазона

§32. Излучение электромагнитных волн.....	68
§33. Распространение электромагнитных волн	70
§34. Импульс, давление электромагнитных волн	72
§35. Спектр электромагнитных волн	74
§36. Виды радиосвязи	76
§37. Радиолокация	78
§38. Радиопередача	80
§39. Радиоприем	82

Глава 6. Геометрическая оптика

§40. Принцип Гюйгенса. Отражение волн	84
§41. Изображение предмета в плоском зеркале	86
§42. Преломление света	88
§43. Полное внутреннее отражение	90
§44. Дисперсия света	92

Оглавление

§45. Линзы.....	94
§46. Собирающая линза. Ход лучей	96
§47. Изображение предмета в собирающей линзе	98
§48. Рассеивающая линза	100
§49. Человеческий глаз как оптическая система	102
§50. Оптические приборы	104

Глава 7. Волновая оптика

§51. Интерференция волн	106
§52. Пространственная интерференционная картина	108
§53. Опыт Юнга. Получение когерентных источников	110
§54. Дифракция света	112
§55. Дифракция света на щели	114
§56. Дифракционная решетка	116

Глава 8. Квантовая теория электромагнитного излучения и вещества

§57. Тепловое излучение	118
§58. Фотоэффект	120
§59. Корпускулярно-волновой дуализм	122
§60. Волновые свойства частиц	124
§61. Планетарная модель атома. Опыт Резерфорда	126
§62. Атом водорода (теория Бора)	128
§63. Излучение и поглощение света атомом	130
§64. Лазер	132
§65. Рентгеновская трубка	134

ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Глава 9. Физика атомного ядра

§66. Состав и размеры ядра	136
§67. Энергия связи нуклонов в ядре	138
§68. Естественная радиоактивность	140
§69. Закон радиоактивного распада	142
§70. Цепная ядерная реакция	144
§71. Ядерный реактор	146
§72. Атомная электростанция	148
§73. Термоядерный синтез. Биологическое действие радиоактивного излучения	150

Глава 10. Элементарные частицы

§74. Классификация элементарных частиц	152
§75. Лептоны и адроны	154
§76. Кварки	156
§77. Фундаментальные частицы	158

Глава 11. Эволюция Вселенной

§78. Астрономические структуры	160
§79. Закон Хаббла	162
§80. Модель Фридмана	164
§81. Периоды эволюции Вселенной	166
§82. Ранняя Вселенная	168
§83. Первичный нуклеосинтез	170
§84. Реликтовое излучение	172
§85. Образование астрономических структур	174
§86. Основные термоядерные реакции в звездах	176
§87. Эволюция звезд различной массы	178
§88. Образование Солнечной системы	180
§89. Планеты Солнечной системы	182

Приложение I. Астрономические структуры. Оптические иллюзии	184
---	-----

Приложение II. Предметный указатель	188
---	-----

Приложение III. Именной указатель	190
---	-----

ВВЕДЕНИЕ

Достижения и прогресс современной технологической цивилизации базируются прежде всего на достижениях физики — науки, определившей возникновение и совершенствование машин и механизмов, источников энергии и излучения, средств связи и компьютерной техники.

Исследуя и формулируя наиболее общие и фундаментальные закономерности в природе, физика смогла объяснить и описать количественно множество природных явлений.

Главная цель настоящего издания — представить физику интересной, наглядной, легко запоминающейся и аргументированной.

Отличительная особенность **«Иллюстрированного атласа по физике»** — наглядное представление физических явлений и принципа действия современных технических устройств с кратким объяснением физических законов, лежащих в их основе.

Иллюстративный материал помогает глубже понять и легче запомнить суть физического явления.

Доказательность, аргументированность изложения базируется на простых математических методах и легко запоминающихся качественных оценках.

В **«Иллюстрированном атласе по физике»** приведены таблицы основных физических величин, их единиц, диапазон их изменения, значения фундаментальных физических констант, 3-D-карты астрономических структур.

Простота и лаконичность изложения курса физики 10–11 классов позволяет продуктивно использовать **«Иллюстрированный атлас по физике»** для подготовки к экзаменам и зачетам, а также как учебное пособие для изучения физики как на базовом, так и на профильном уровне. Заголовки тем, изучаемых на профильном уровне, выделены красным цветом.

Особенно эффективно использование «Иллюстрированного атласа по физике» при подготовке к ЕГЭ.

§1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА ТОКА

Перенос энергии электромагнитного поля в пространстве происходит при направленном движении электрических зарядов. В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объему проводника, наибольшая. Поэтому для передачи энергии электромагнитного поля из одной точки пространства в другую используют металлические проводники подобно тому, как для транспортировки воды применяют трубы. В отсутствие внешнего электрического поля ($\vec{E} = 0$), тепловое движение зарядов (показанное на рисунке ① серыми линиями) является хаотическим. Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению. Поэтому направленное движение свободных зарядов в проводнике возможно под действием электрического поля.

Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

В проводнике, помещенном в электрическое поле ($\vec{E} \neq 0$) происходит наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое. В результате действия на заряды внешней кулоновской силы положительный заряд, притягиваясь к отрицательному полюсу и отталкиваясь от положительного, приобретает составляющую скорости v_+ вдоль напряженности электрического поля, или **направленную скорость**. За промежуток времени t положительный заряд «дрейфует» на расстояние $l_+ = v_+ t$ в направлении напряженности электрического поля (черная линия на рисунке). Отрицательный заряд смещается со скоростью «дрейфа» v_- в направлении, противоположном напряженности электрического поля на расстояние $l_- = v_- t$ ②.

За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц. Направление тока совпадает с направлением напряженности электрического поля ③.

В металлах, где носителями тока являются свободные, отрицательно заряженные электроны, направление тока считается противоположным направлению их скорости направленного движения. Интенсивность направленного движения заряженных частиц в проводнике характеризует величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или сила тока.

Сила тока — производная по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени t ④:

$$I = q'$$

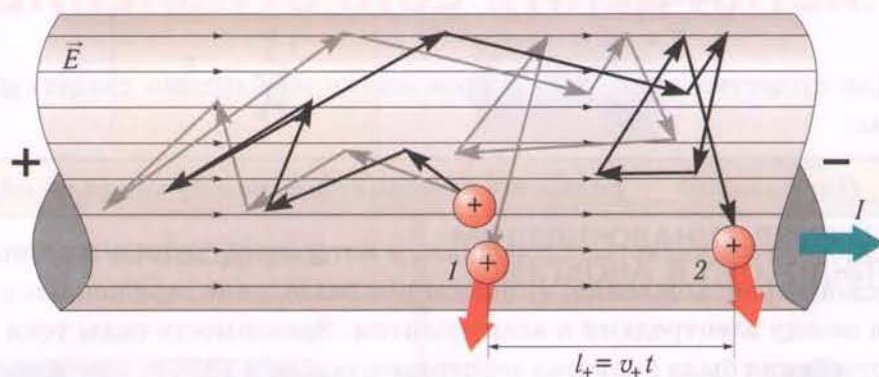
Единица силы тока (основная единица СИ) — **ампер** (1 А): $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$.

При расчете силы тока учтем, что за время t сквозь сечение проводника пройдут только заряды, движущиеся со скоростью v сонаправленно с напряженностью внешнего электрического поля, которые находятся внутри цилиндра сечением S с образующей $l = vt$. Зная концентрацию n заряженных частиц, можно найти число заряженных частиц в этом объеме: $N = nSvt$, и определить их заряд: $q = q_0 nSvt$, где q_0 — заряд одной частицы. Тогда сила тока $I = q' = q_0 nSv$. Если $v = \text{const}$, то $I = \text{const}$.

Постоянный ток — ток, сила которого не изменяется с течением времени.

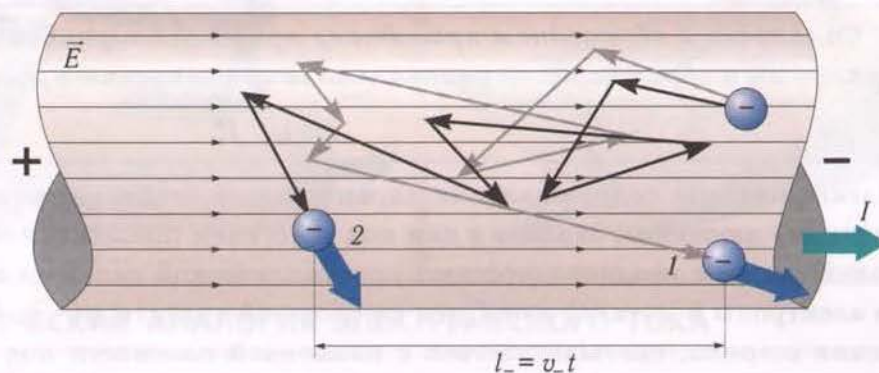
ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ПРОВОДНИКЕ

①



$\vec{E} = 0$
 $\vec{E} \neq 0$

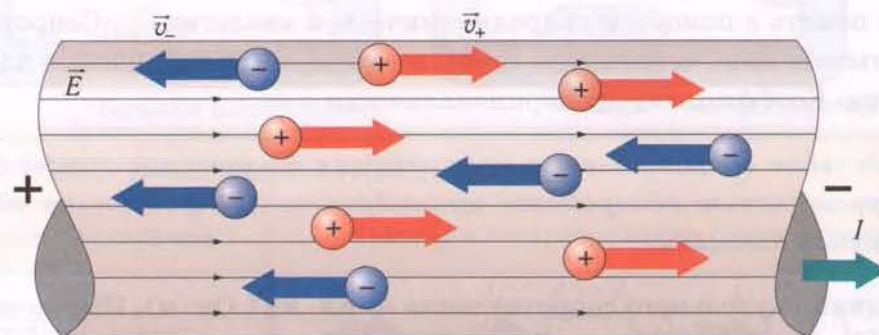
②



В электрическом поле упорядоченное движение зарядов накладывается на хаотическое тепловое движение

НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА

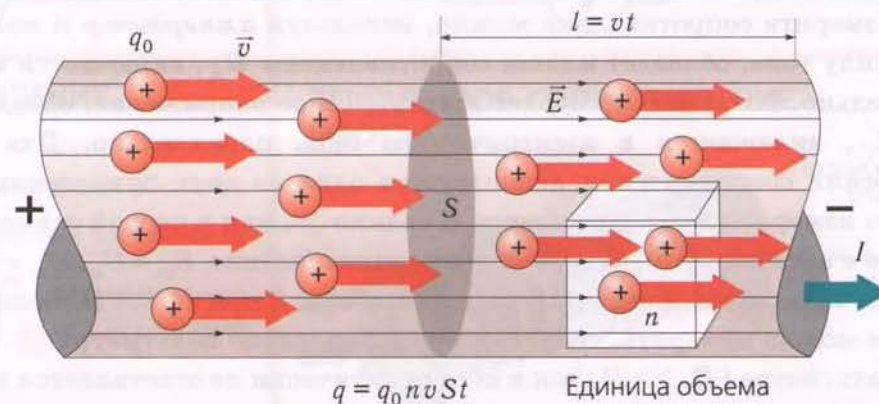
③



Направление тока в проводнике – направление движения положительно заряженных частиц

СИЛА ТОКА

④



$$I = q' = q_0 n v S$$

$$q = q_0 n v S t$$

Единица объема

Глава 1. Постоянный электрический ток

§2. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДНИКА (УЧАСТКА ЦЕПИ). СОПРОТИВЛЕНИЕ

Для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Напряжение — разность потенциалов между концами однородного проводника.

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов, например, за счет химической реакции между электродами и электролитом. Зависимость силы тока для однородного проводника от напряжения была получена экспериментально в 1826 г. немецким ученым *Георгом Омом* ①:

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = U / R. \quad (1)$$

Электрическое сопротивление характеризует степень противодействия проводника направленному движению зарядов в нем под действием приложенной разности потенциалов. Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решетки или примесями другого элемента электроны в металле движутся по сложной траектории ②. Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающегося с наклонной плоскости под действием силы тяжести и сталкивающегося с выступающими цилиндрическими штырями ③.

Зависимость сопротивления проводника от его длины l и площади поперечного сечения S :

$$R = \rho l / S, \quad (2)$$

легко понять с помощью гидродинамической аналогии ④. Сопротивление движению, которое испытывает вода, текущая по трубе, возрастает при увеличении длины трубы и уменьшении ее сечения. Коэффициент пропорциональности ρ —

удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади.

Единица удельного сопротивления — $\text{ом} \cdot \text{м}$ ($1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Изменение сопротивления проводника в соответствии с формулой (2) возможно либо при изменении его длины (как в реостате — проводнике с переменным сопротивлением), либо при различном составе и объеме наполнителя (как в резисторе — проводнике с постоянным сопротивлением).

Измерить сопротивление можно, используя *амперметр* и *вольтметр*. Амперметр измеряет силу тока, обладает малым сопротивлением R_A , включается в электрическую цепь последовательно. Вольтметр измеряет электрическое напряжение, обладает большим сопротивлением R_V , включается в электрическую цепь параллельно. Для уменьшения погрешности измерения сопротивления используется одна из двух приведенных схем. Если предположительно измеряемое сопротивление R велико ⑤, как в первой схеме, оно включается последовательно с амперметром. В этом случае сопротивление $R_m = U_{ac} / I_a = R + R_A$, измеренное по показаниям вольтметра и амперметра, стремится к R при $R_A \ll R$. Величину малого сопротивления точнее можно измерить, соединяя его параллельно вольтметру ⑥. Из-за большого сопротивления вольтметра ($R_V \gg R$) ток в него практически не ответвляется в точке a . Весь ток протекает через измеряемое сопротивление R .

①

ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

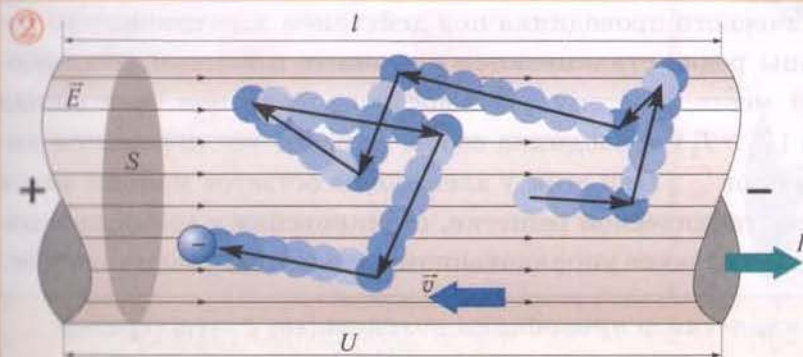
$$I = \frac{U}{R}$$

R – сопротивление

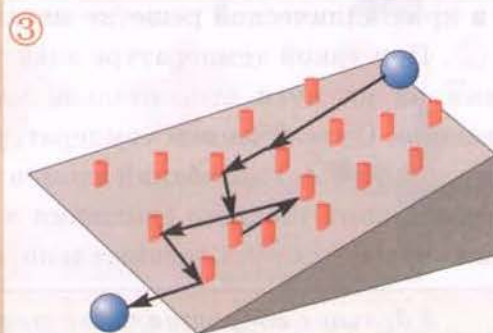
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ – удельное сопротивление

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

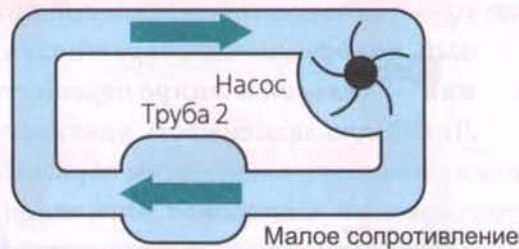


МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ПРОВОДНИКЕ



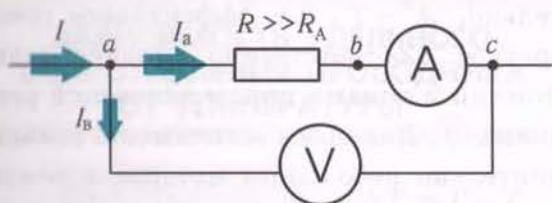
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

④ Масса жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени, эквивалентна силе тока в электрической цепи

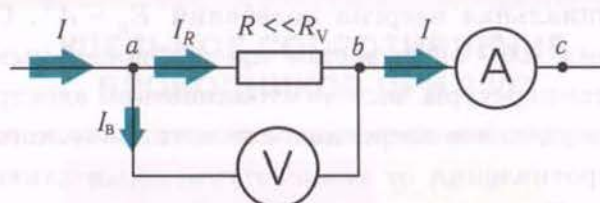


ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

⑤ Схема для измерения больших сопротивлений



⑥ Схема для измерения малых сопротивлений



ПОСТОЯННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (РЕЗИСТОР)



ПЕРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (РЕОСТАТ)



§3. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура проводника влияет на характер движения электронов в проводнике и соответственно на удельное сопротивление проводника, зависящее от частоты столкновений электронов с неоднородностями кристаллической решетки и примесями другого элемента в проводнике. В кристаллической решетке проводника происходят хаотические тепловые колебания атомов и ионов около положений равновесия (узлов). При малой температуре T_1 амплитуда A_1 тепловых колебаний атомов и ионов невелика ①, и электроны почти беспрепятственно движутся в кристаллической решетке металлического проводника под действием электрического поля ②. При такой температуре электроны редко сталкиваются с атомами и ионами, занимающими на их пути относительно мало места, поэтому удельное сопротивление проводника невелико. С увеличением температуры ($T_2 > T_1$) проводника соответственно увеличивается амплитуда ($A_2 > A_1$) колебаний атомов и ионов ③. При этом у электронов остается меньше места для беспрепятственного движения в кристаллической решетке, столкновения с атомами и ионами учащаются ④. Следовательно, сопротивление упорядоченному движению увеличивается.

Удельное сопротивление металлического проводника возрастает с температурой T по линейному закону:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ($T_0 = 293\text{ K}$); $\Delta T = T - T_0$; α — температурный коэффициент сопротивления. Единица температурного коэффициента сопротивления — кельвин в минус первой степени (K^{-1}).

Линейную зависимость удельного сопротивления металлического проводника качественно можно пояснить следующим образом. Удельное сопротивление прямо пропорционально частоте столкновений электронов. Она складывается из частоты столкновений с неоднородностями решетки, не зависящей от температуры, и частоты столкновений с атомами и ионами, упорядоченно расположенными в кристаллической решетке. Последняя линейно зависит от температуры. Это связано с тем, что потенциальная энергия E_p колебаний атома с амплитудой A оказывается по порядку величины равной внутренней энергии kT : $E_p \approx kT$. В то же время потенциальная энергия колебаний $E_p \sim A^2$. Следовательно, $A^2 \sim T$, т.е. эффективное сечение атома πA^2 оказывается пропорциональным температуре. Соответственно линейно зависят от температуры частота столкновений электрона с атомами и ионами кристаллической решетки и удельное сопротивление металлического проводника ⑤. Линейная зависимость удельного сопротивления от температуры справедлива в сравнительно небольшом интервале температур ΔT .

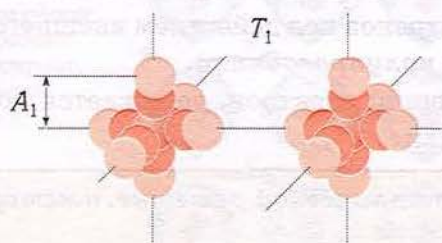
При низких температурах ($\approx 10\text{ K}$) наблюдается резкая зависимость удельного сопротивления от температуры, характерная для сверхпроводящего состояния.

Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления $\alpha \approx 1/273\text{ K}^{-1}$. По изменению температуры проволоки можно определить температуру в диапазоне температур, недоступном для жидкостных термометров.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

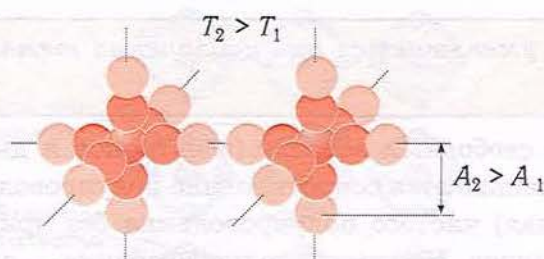
КОЛЕБАНИЯ ИОНОВ В УЗЛАХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

- ① При малой температуре T_1 амплитуда колебаний A_1 ионов относительно положения равновесия невелика



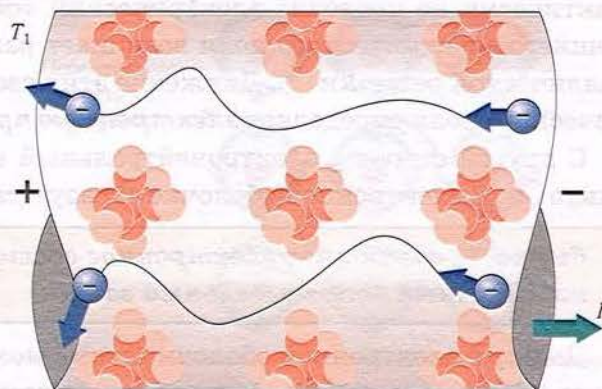
- ③ С увеличением температуры $T_2 > T_1$ амплитуда колебаний A_2 ионов возрастает:

$$A_2 > A_1$$

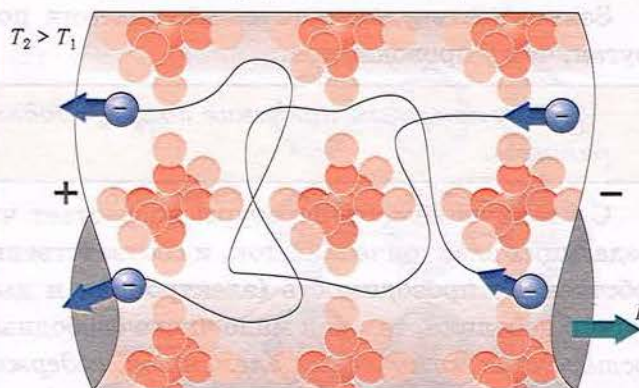


ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ

- ② При малой температуре T_1 колебания ионов несут существенно препятствуют направленному движению электронов



- ④ При увеличении температуры $T_2 > T_1$ возрастание амплитуды колебаний ионов препятствует направленному движению электронов



ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

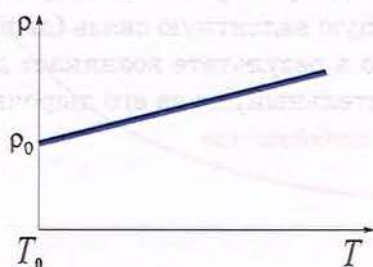
УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ ПРИ 200°

⑤

$$\rho = \rho_0 (1 + \Delta T)$$

$$\Delta T = T - T_0$$

$$\Delta T = 293 \text{ K}$$



Вещество	$\rho_0, \text{Ом} \cdot \text{м}$
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2,4 \cdot 10^{-8}$
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$
Платина	10^{-7}
Сталь	$2 \cdot 10^{-7}$
Манганин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	$4,4 \cdot 10^{-7}$
Константан (60% Cu, 40% Ni)	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Ртуть	$9,6 \cdot 10^{-7}$
Нихром (58% Ni, 25% Cu, 16% Cr)	10^{-6}

§4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Величина удельного сопротивления полупроводников, являющегося промежуточным между удельными сопротивлениями проводников и диэлектриков, определяется механизмом образования свободных зарядов — носителей электрического тока. В качестве примера рассмотрим кристалл кремния, атомы которого имеют на внешней оболочке по четыре электрона. При низких температурах электроны прочно связаны в атомах, свободных электронов нет, кремний практически не проводит электрический ток. При нагревании кристалла или под действием внешнего электрического поля возникает разрыв связей некоторых электронов с ионами кристаллической решетки ①. Движение этих свободных электронов под действием внешнего электрического поля определяет *электронную проводимость полупроводника*.

С другой стороны электронейтральный атом, потерявший электрон, заряжается положительно ②. В электронной оболочке образуется вакансия, или

дырка — вакантное электронное состояние в кристаллической решетке, имеющее избыточный положительный заряд.

Дырку в электронной оболочке атома может заполнить электрон соседнего атома. При этом на его прежнем месте образуется новая дырка, которая затем может аналогично перемещаться по кристаллу. Движение валентных электронов между электронными оболочками соседних атомов на вакантные места (дырки) под действием внешнего электрического поля определяет *дырочную проводимость полупроводника*.

Зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры принципиально другая, чем у проводников.

Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.

С увеличением температуры возрастает число свободных зарядов (электронов и дырок), создающих электрический ток, и соответственно уменьшается сопротивление полупроводника. Собственная проводимость (электронная и дырочная) чистого полупроводника без примесей обычно невелика, так как мало число свободных зарядов. *Примеси в полупроводнике — атомы посторонних химических элементов, содержащиеся в основном полупроводнике. Примесная проводимость — проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей.* Дозированное введение в чистый полупроводник примесей позволяет целенаправленно изменять число носителей заряда, их знак, проводимость полупроводника.

Если валентность атома примеси больше валентности атома основного полупроводника, говорят о донорной примеси ③, а если меньше — об акцепторной ④.

Пример донорной примеси — пятивалентные атомы As в четырехвалентном Ge. Пятый валентный электрон атома As слабее связан с атомом и под действием внешнего электрического поля легко отрывается от атома, становясь свободным. Полупроводник с донорной примесью — *полупроводник n-типа* (от лат. negativus — отрицательный). Примером акцепторной примеси в Ge являются трехвалентные атомы галлия Ga. Недостающую валентную связь (дырку) может заполнить валентный электрон соседнего атома, у которого в результате возникает дырка. Такой *полупроводник — p-типа* (от лат. positivus — положительный) из-за его дырочной проводимости.

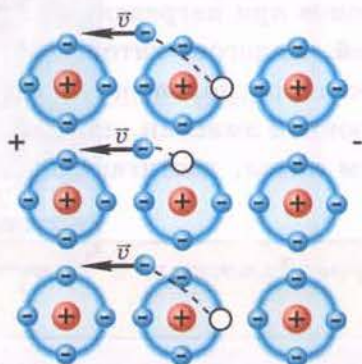
СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Возникновение носителей электрического тока в полупроводнике

Электронная проводимость полупроводника

①

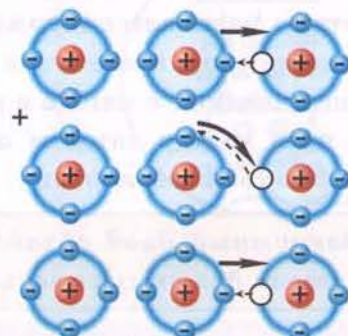
Образование
свободного
электрона
и дырки



Дырочная проводимость полупроводника

②

Перемещение
валентного
электрона



ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

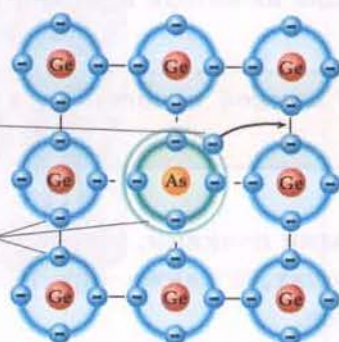
Фрагмент кристаллической решетки примесных полупроводников

Донорный полупроводник

③

Донорная
примесь

Валентные
электроны



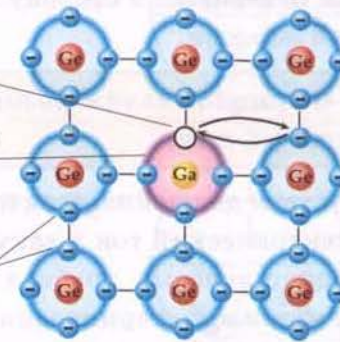
Акцепторный полупроводник

④

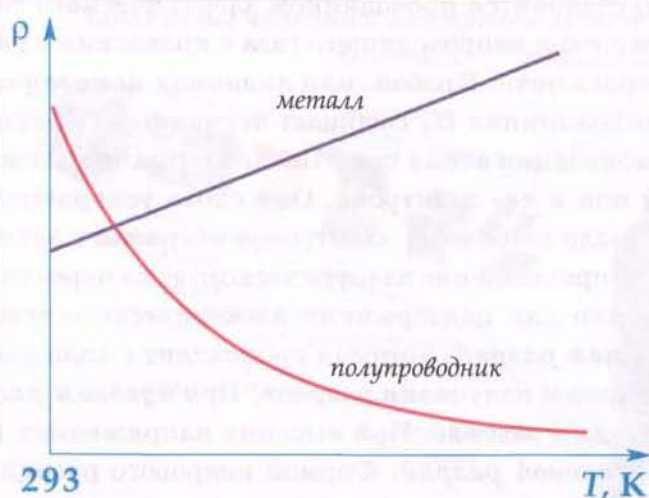
Дырка

Акцепторная
примесь

Валентные
электроны



Зависимость удельного сопротивления металла
и полупроводника от температуры



УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

$t = 20^\circ \text{C}$

ВЕЩЕСТВО	ρ , Ом · м
Углерод	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Поваренная соль (насыщенный раствор)	0,044
Германий	0,5
Кровь	1,5
Жир	25
Кремний	2300

§5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

Электрический ток в вакууме (разреженном газе, в котором молекулы не сталкиваются между собой в пределах сосуда) может протекать, если ввести в сосуд свободные заряды. В двухэлектродной электронной лампе — *вакуумном диоде* — электроны появляются в вакуумированном стеклянном баллоне в результате нагревания до высокой температуры одного из электродов — *катода* ①. Процесс испускания электронов при нагревании катода до высокой температуры называется *термоэлектронной эмиссией*. Подогрев катода обеспечивается выделением тепла при протекании тока через спираль накала, расположенную внутри него. Электроны, испущенные с катода в результате термоэлектронной эмиссии, под действием электрического поля между катодом и *анодом*, окружающим катод, достигают анода ②. Обратное направление тока невозможно.

Вакуумный диод обладает односторонней проводимостью и может быть использован для выпрямления переменного тока.

Для регулирования величины анодного тока используют трехэлектродную электронную лампу — *триод* ③. Для этого в триоде между катодом и анодом помещается третий электрод (в виде спирали) — *сетка* ④.

Положительная разность потенциалов между сеткой и катодом увеличивает анодный ток,

так как оттягивает в сторону анода электроны, вылетевшие из катода в результате термоэлектронной эмиссии.

Отрицательная разность потенциалов между сеткой и катодом уменьшает анодный ток,

препятствуя движению электронов от катода.

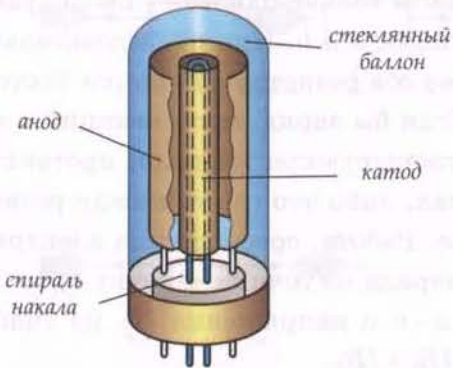
Электрический ток в вакууме, созданный электронными пучками, широко используется в электронно-лучевых трубках ⑤, электронных микроскопах, а также при нагреве, резке и сварке металлов, стерилизации медицинских инструментов.

Из-за практического отсутствия свободных зарядов при нормальных условиях газ не проводит электрический ток. Появление в газе значительного числа свободных зарядов возможно в результате внешней ионизации: нагревания газа, воздействия на него излучения, внешнего электрического поля. Ионизованный газ (плазма) становится проводником электрического тока. *Электрический пробой газа* — процесс превращения непроводящего газа в проводник в результате приложения к нему сильного электрического поля. Пробой, или *лавинная ионизация газа*, начинается, когда приложенное напряжение зажигания U_3 сообщает первичным («затравочным») электронам энергию, достаточную для ионизации атома газа. После ионизации атома электронным ударом образуется положительный ион и два электрона. Они снова ускоряются электрическим полем и производят ионизацию. Число свободных электронов возрастает лавинообразно. Зажигается *самостоятельный разряд*: прохождение электрического тока через газ перестает зависеть от внешних ионизаторов. Однако для поддержания электрического тока требуется эмиссия электронов с катода. При *тлеющем разряде* эмиссия происходит с холодного катода под действием ударов положительных ионов и излучения разряда. При *дуговом разряде* эмиссия электронов — результат нагрева катода в разряде. При высоких напряжениях и давлении газа порядка атмосферного возникает *искровой разряд*. Формой искрового разряда является молния.

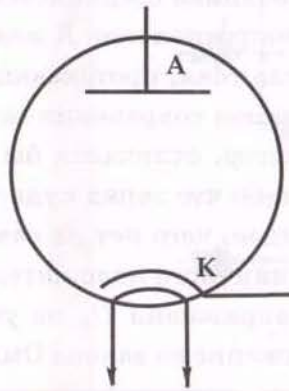
ВАКУУМНЫЙ ДИОД

①

Конструкция

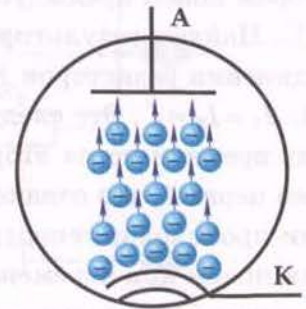


Условное обозначение



②

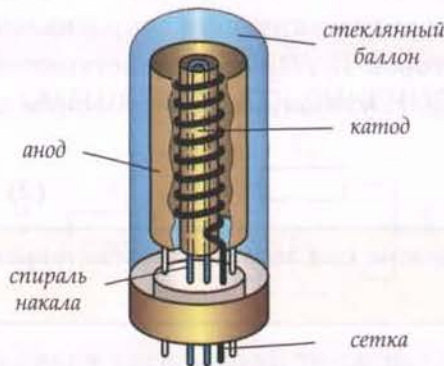
Ток насыщения



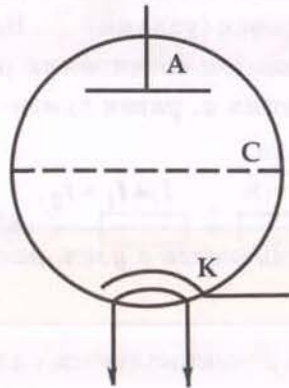
ТРИОД – трехэлектродная электронная лампа

③

Конструкция



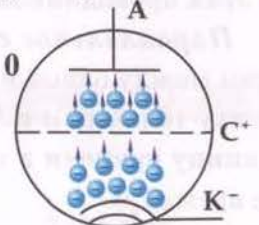
Условное обозначение



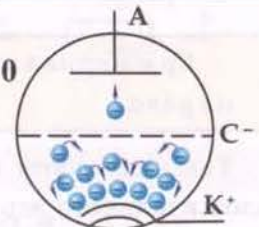
Сетка – регулятор анодного тока

④

$$\varphi_c - \varphi_k > 0$$



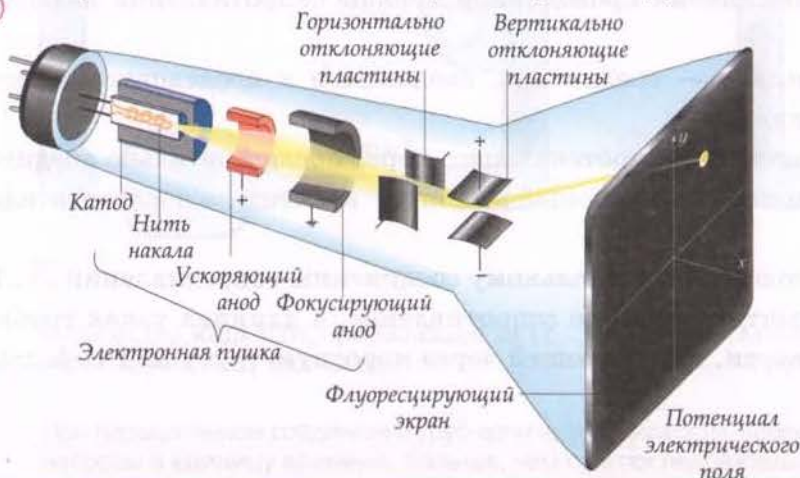
$$\varphi_c - \varphi_k < 0$$



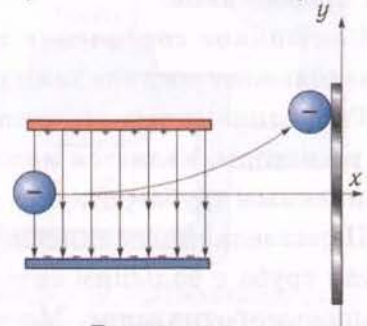
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

⑤

Заряженные частицы в электронно-лучевой трубке



Траектория электрона перед попаданием на экран



Вертикально отклоняющие пластины

§6. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Основными типами соединений элементов электрической цепи являются последовательное и параллельное соединения. **Последовательное соединение проводников** — соединение, при котором конец предыдущего проводника соединяется с началом только одного — последующего ①. Найдем результирующее сопротивление R между точками a и b . При последовательном соединении резисторов R_1, R_2 сила тока, протекающего через оба резистора, остается постоянной: $I_1 = I_2 = I$. Это следует из закона сохранения заряда. Если бы заряд, протекающий в единицу времени через второй резистор, отличался бы от соответствующего заряда, протекшего через первый, это означало бы, либо что заряд куда-то пропал, либо что где-то между резисторами происходит генерация зарядов, чего нет на самом деле. Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении единичного положительного заряда из точки a в точку b , т.е. напряжение U , складывается из напряжения U_1 на участке $a-c$ и напряжения U_2 на участке $c-b$: $U = U_1 + U_2$. Выразим напряжение из закона Ома: $IR = IR_1 + IR_2$.

При последовательном соединении резисторов общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2. \quad (1)$$

Сопротивление последовательного соединения проводников больше сопротивления любого из этих проводников.

Параллельное соединение проводников — соединение, при котором проводники подключены между одной и той же парой точек (узлами) ②. Найдем результирующее сопротивление R между точками a и b . При параллельном соединении резисторов R_1, R_2 заряд, поступающий в единицу времени в точку разветвления a , равен сумме зарядов, уходящих из этой точки за это же время:

$$I = I_1 + I_2. \quad (2)$$

Суммарная сила тока, втекающего в узел, равна сумме сил токов, вытекающих из узла.

Так как работа электрических потенциальных сил не зависит от формы пути единичного положительного заряда между двумя точками, напряжение на каждом из параллельно соединенных проводников одно и то же:

$$U_1 = U_2 = U. \quad (3)$$

Выразим силу тока для каждого проводника в (2) с учетом (3). Тогда $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

Сопротивление параллельного соединения проводников меньше сопротивления любого из этих проводников.

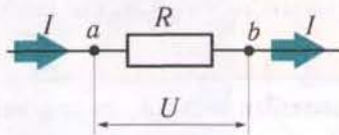
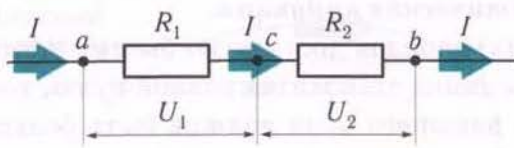
Смешанное соединение проводников — соединение, сводящееся к последовательному и параллельному соединениям проводников ③.

Гидродинамическим аналогом силы тока, протекающего через последовательно соединенные резисторы, является масса жидкости, протекающей в единицу времени по последовательно соединенным трубам ④.

Параллельное соединение труб подобно параллельному соединению сопротивлений ⑤. Короткая труба с большим сечением имитирует малое сопротивление, а длинная узкая труба — большое сопротивление. Масса жидкости, протекающей через короткую трубу за 1 с, больше, чем через длинную.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

①



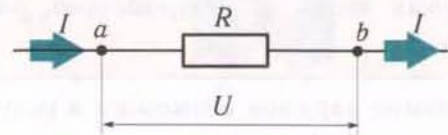
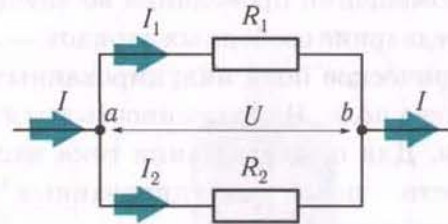
$$I = I_1 = I_2, \quad U = U_1 + U_2, \quad IR = IR_1 + IR_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$R > \{R_1, R_2\}$$

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

②



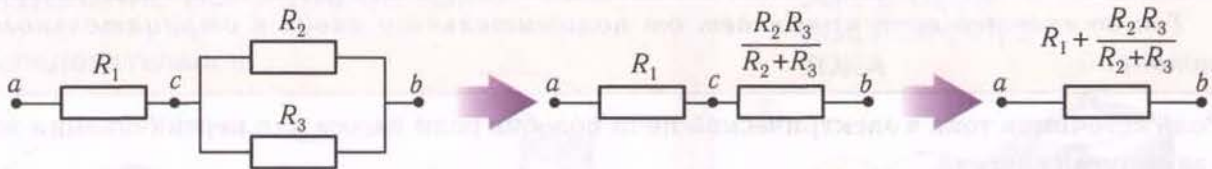
$$I = I_1 + I_2, \quad \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R < \{R_1, R_2\}$$

СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ

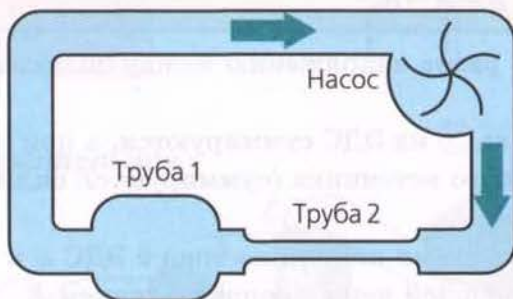
③



ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ СОЕДИНЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ

④

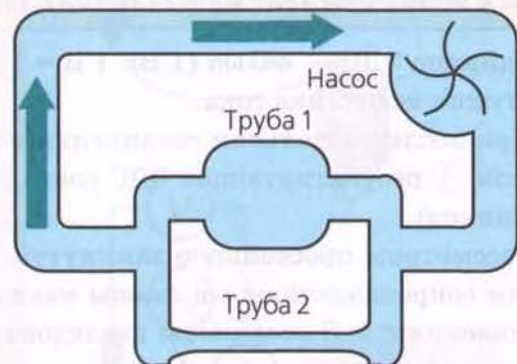
Последовательное соединение труб



Количество жидкости, протекающее за 1 с через трубы 1 и 2, одинаково

⑤

Параллельное соединение труб



Количество жидкости, протекающее за 1 с через трубу 1, больше, чем через трубу 2

При параллельном соединении труб количество жидкости, перекачиваемое насосом в единицу времени, больше, чем при последовательном

§7. ЭДС. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ

При помещении проводника во внешнее постоянное электрическое поле в нем происходит перераспределение свободных зарядов — *электростатическая индукция*.

Электрическое поле индуцированных (наведенных) зарядов достаточно быстро компенсирует внешнее поле. Напряженность поля внутри проводника становится равной нулю, ток прекращается. Для существования тока напряженность внешнего поля должна быть больше напряженности поля индуцированных зарядов. Для этого к проводнику подводит дополнительные заряды

источник тока — устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды.

Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергии в электрическую. *Сторонние силы* — силы неэлектрического происхождения, вызывающие разделение зарядов. В кислотном аккумуляторе, например, заряды на электродах оказываются разноименными за счет энергии химической реакции медного (Cu) и цинкового (Zn) электродов с электролитом (раствором серной кислоты H_2SO_4) ①. Под действием притяжения отрицательных ионов SO_4^{2-} положительно заряженные ионы цинка Zn^{2+} и меди Cu^{2+} переходят в раствор. В результате ухода положительных зарядов электронейтральные электроды заряжаются отрицательно. Из-за меньшей энергии связи с кристаллической решеткой ионы Zn^{2+} легче покидают электрод, чем ионы Cu^{2+} . Поэтому цинковый электрод, имеющий меньший потенциал, является отрицательным полюсом источника — *катодом*, а медный — положительным — *анодом*.

Ток во внешней цепи протекает от положительного анода к отрицательному катоду.

Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости в замкнутой системе.

Широко распространенными источниками тока являются элемент питания с угольно-цинковыми электродами и ртутная батарейка, используемая в калькуляторах и часах ②.

ЭДС — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному к величине этого заряда: $\mathcal{E} = A_c / q$.

Единица ЭДС — *вольт* (1 В). 1 В = 1 Дж/Кл. ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.

При последовательном соединении источников тока ③ их ЭДС суммируются, а при параллельном ④ результирующая ЭДС совпадает с ЭДС одного источника (суммируются силы тока источников).

Рассмотрим простейшую замкнутую цепь, состоящую из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r и лампы накаливания во внешней цепи с сопротивлением R ⑤. Сопротивления r и R соединены последовательно. Силу тока в цепи определяет *закон Ома для замкнутой цепи*:

Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:

$$I = \mathcal{E} / (R + r).$$

ИСТОЧНИКИ ТОКА

Кислотный аккумулятор



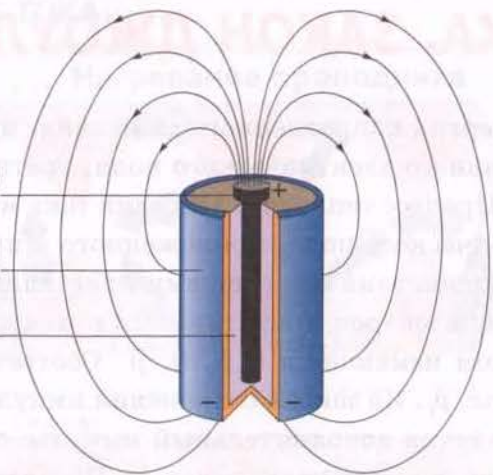
Элемент питания

②

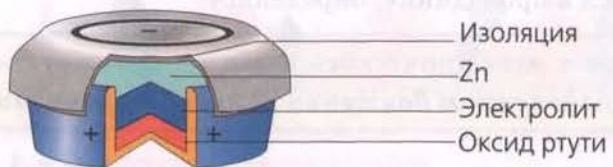
Угольный электрод

Цинковая оболочка

Хлорид аммония

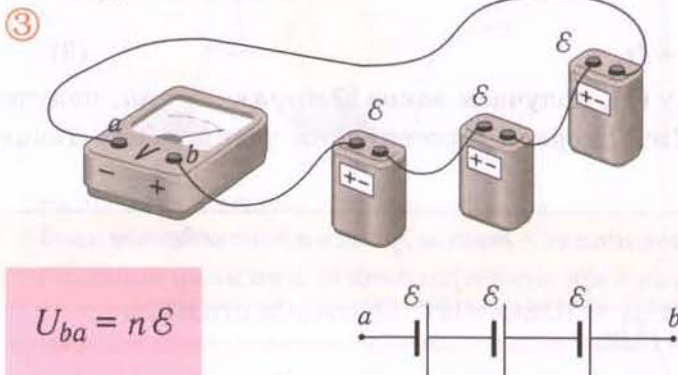


Миниатюрная батарейка

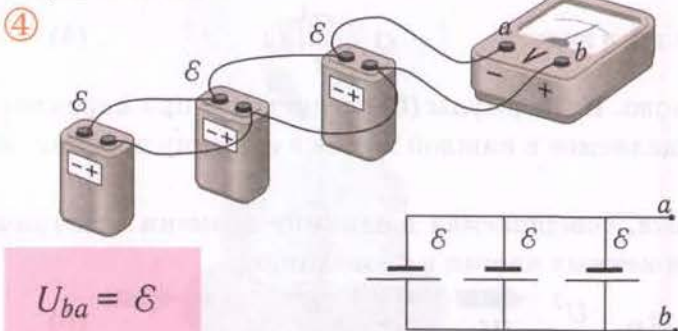


СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

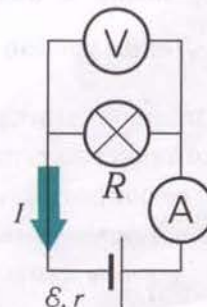
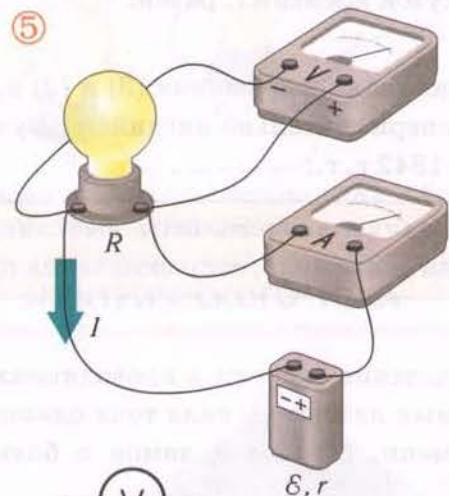
Последовательное



Параллельное



ЭДС В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

§8. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА

Энергия направленного движения, приобретаемая электронами в проводнике под действием внешнего электрического поля, тратится на нагревание кристаллической решетки проводника. Процесс теплового действия тока можно представить следующим образом. Под действием электрического поля, приложенного к проводнику, электроны ускоряются в промежутках между столкновениями с ионами кристаллической решетки. При приближении к положительному иону электрон притягивается к нему, изменяя направление движения. Импульс электрона при этом изменяется с $\vec{p}_0$ на $\vec{p}$. Соответственно ион притягивается к электрону, приобретая импульс $\vec{p}_i$. Из закона сохранения импульса $\vec{p}_i = \vec{p}_0 - \vec{p}$.

Получив дополнительный импульс от электрона, ион совершает колебательное движение около положения равновесия ①. Последующие столкновения иона с другими электронами увеличивают амплитуду колебаний ионов, среднюю энергию решетки и соответственно температуру проводника ②. Количество теплоты, получаемое кристаллической решеткой, т.е. выделяющееся в проводнике, определяет

работа электрического тока — работа, совершаемая электрическим током при упорядоченном движении зарядов в проводнике.

$$Q = A. \quad (1)$$

Работу по перемещению единичного положительного заряда характеризует разность потенциалов U . Для заряда q

$$A = qU = qIR. \quad (2)$$

При постоянной силе тока I заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени t , равен:

$$q = It. \quad (3)$$

Подставляя выражения (3) и (2) в формулу (1), получаем **закон Джоуля–Ленца**, полученный экспериментально английским ученым Дж. Джоулем и российским ученым Э.Х. Ленцем в 1831–1842 г. г.:

Количество теплоты, выделяемое в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения по нему тока ③:

$$Q = I^2 Rt. \quad (4)$$

Выделение энергии в проводниках зависит от типа их соединения. В последовательно соединенных лампах ④ сила тока одинакова, поэтому количество теплоты, выделяемое в единицу времени, больше в лампе с большим сопротивлением. При параллельном соединении ламп ⑤ закон Джоуля–Ленца удобно представить в виде:

$$Q = \frac{U^2}{R} t, \quad (5)$$

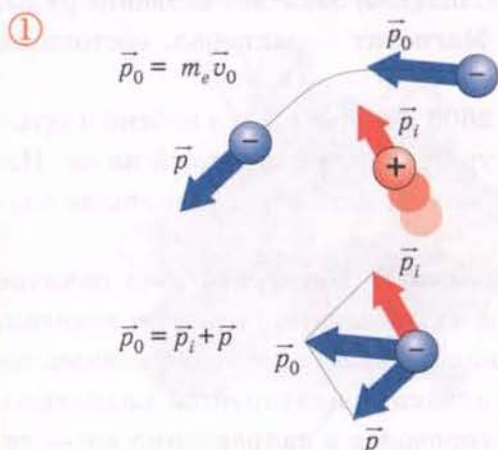
так как напряжение U на проводниках одинаково. Из формулы (5) следует, что при параллельном соединении ламп количество теплоты, выделяемое в каждой лампе в единицу времени, обратно пропорционально ее сопротивлению.

Мощность электрического тока — работа, совершаемая в единицу времени электрическим полем при упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Q}{t} = I^2 R = \frac{U^2}{R} = IU. \quad (6)$$

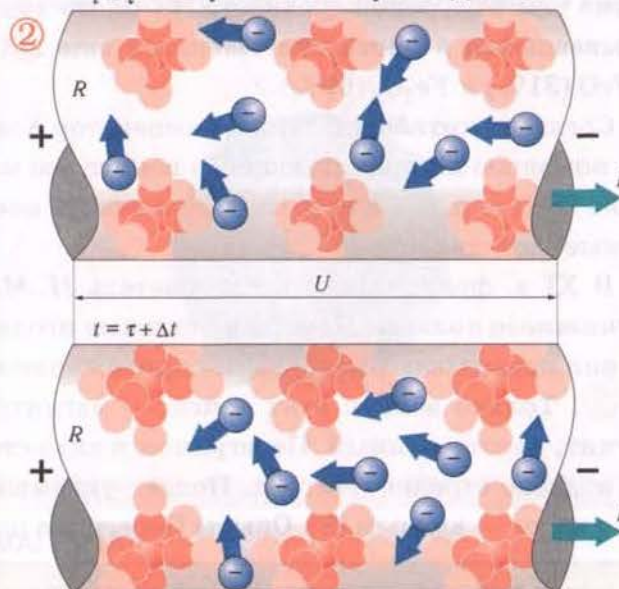
ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Взаимодействие электрона с ионом



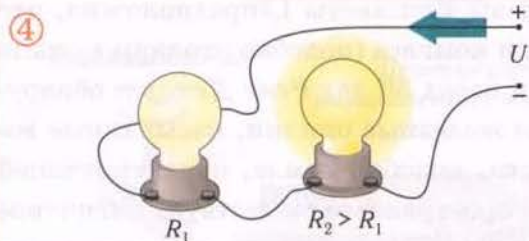
Энергия, приобретаемая электронами под действием электрического поля, идет на увеличение амплитуды колебаний ионов, т.е. на нагревание проводника

Нагревание проводника

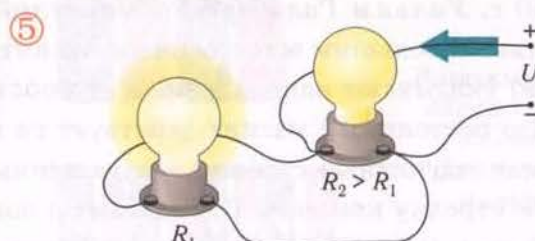


③ ЗАКОН ДЖОУЛЯ–ЛЕНЦА:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

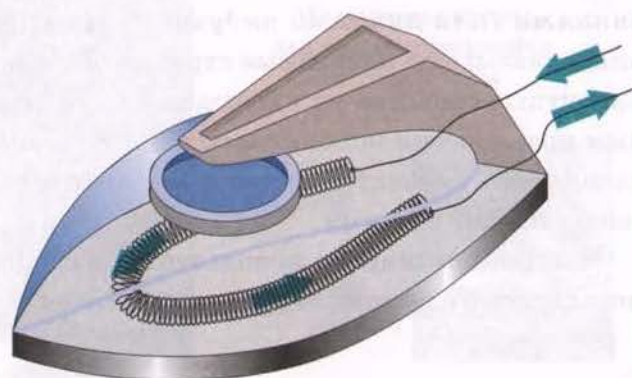
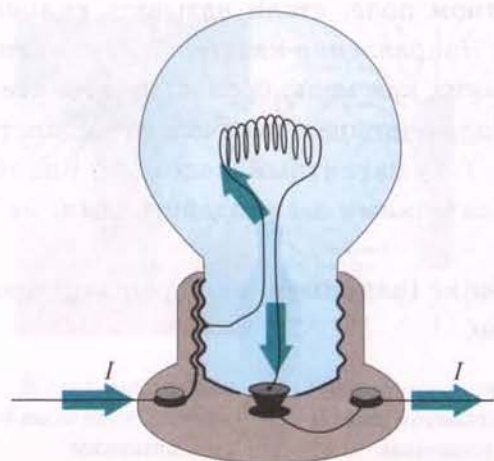


При последовательном соединении лампа с большим сопротивлением горит ярче



При параллельном соединении лампа с большим сопротивлением горит слабее

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА



§9. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Свойство магнетита (или магнитного железняка) притягивать железные предметы было известно уже в глубокой древности ①. Слово «магнит» (от греч. *magnes*) означает название руды, добывавшейся в местности Магнезия еще 2500 лет назад. Магнетит — минерал, состоящий из FeO (31%) и Fe_2O_3 (69%).

Согласно китайской легенде император Хванг Ти (около 2600 лет до н.э.) вел войско в тумане с помощью поворачивающейся вокруг оси магнитной фигурки, всегда смотрящей на юг. Начиная со II в. н.э. в Китае изготавливались *постоянные магниты*, надолго сохранявшие магнитные свойства.

В XI в. французский исследователь *П. Марикур* (псевдоним *П. Перегрин*) ввел понятие *магнитного полюса*. Помещая стальные иголки вблизи шара из магнетита, Перегрин заметил, что они испытывают наибольшее притяжение вблизи двух диаметрально противоположных точек ②. Только вблизи этих точек — магнитных полюсов иголка ориентируется радиально. Магнит, изготовленный Перегрином в виде стержня, ориентировался в направлении юг — север подобно стрелке компаса. Полюс, указывающий направление на север, называли северным (N), а на юг — южным (S). Опыты Перегрин показали, что

одноименные магнитные полюса отталкивают друг друга ③, а разноименные притягивают ④.

Все попытки их разделить и получить магнитный монополюс (магнитный заряд) не увенчались успехом ⑤. Каждый фрагмент разделенного магнита имел два полюса: северный и южный.

В 1600 г. *Уильям Гильберт*, врач английской королевы Елизаветы I, предположил, что Земля является большим естественным магнитом, а стрелки компаса (подобно иголкам в опыте Перегрин) указывают направление к его полюсам. Почти через 50 лет *Рене Декарт* обнаружил ⑥, что постоянный магнит действует на мельчайшие железные опилки, насыпанные вокруг него, и магнитные стрелки, размещенные поблизости, подобно Земле, ориентирующей магнитную стрелку компаса. Тем самым он показал, что в пространстве существует магнитное взаимодействие (поле). Магнитное поле Земли не остается постоянным, медленно изменяясь со временем. Через достаточно большие интервалы времени может происходить обмен местами (инверсия) магнитных полюсов. За последние 30 млн лет среднее время между инверсиями составляло около 150000 лет. Магнитные поля существуют и у ряда планет Солнечной системы: Меркурия, Марса, Юпитера, Сатурна. У Венеры и Луны магнитное поле отсутствует.

Линии, образуемые железными опилками в магнитном поле, стали называть *силовыми линиями (или линиями индукции) магнитного поля*. Направление касательных к этим линиям указывают магнитные стрелки. У ряда веществ, таких как медь, бронза, дерево, стекло, магнитные свойства не наблюдаются. На протяжении более четырех тысячелетий единственным практически используемым источником магнетизма был магнитный железняк. Вплоть до начала XIX в. электричество и магнетизм считались физическими взаимодействиями, не связанными друг с другом.

Магнетизм широко используется в современной технике (например, для транспортировки металлолома с помощью магнитного крана ⑦) и медицине.

МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

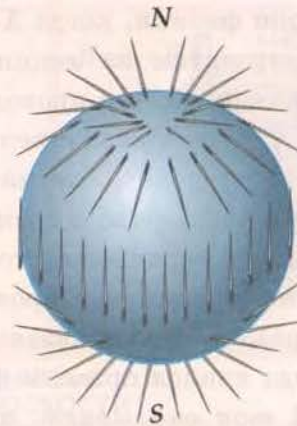
Притяжение стальных предметов магнитом

①



Иголки вблизи поверхности намагниченного шара

②



ПОЛЮСЫ МАГНИТА

③



Отталкивание
одноименных полюсов



④



Притяжение
разноименных полюсов



⑤



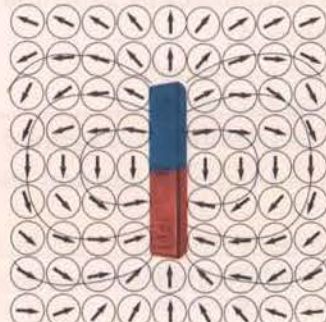
Возникновение
двух полюсов
в любых
фрагментах
магнита

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

⑥



Железные опилки
в поле постоянного
магнита



Магнитные стрелки
в поле постоянного
магнита



Магнитные краны
для транспортировки
металлолома



⑦

§10. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Разгадка взаимосвязи электричества и магнетизма пришла лишь после того, как исследователи научились получать электрический ток. В 1820 г. было сделано одно из важнейших открытий в истории физики, когда *Ханс Эрстед*, профессор Копенгагенского университета, демонстрировал студентам на лекции нагревание проводника электрическим током. Эрстед обратил внимание на то, что проводник в отсутствие тока ① располагается вдоль магнитного поля Земли, на что указывала стрелка компаса, случайно оказавшегося на столе под проводником. При включении тока ② магнитная стрелка отклонилась почти перпендикулярно проводнику, что свидетельствовало о возникновении дополнительного магнитного поля, созданного током. Изменение направления тока на противоположное ③ сопровождалось отклонением стрелки в противоположную сторону, что означало изменение направления магнитного поля тока. Таким образом, было показано, что электрический ток воздействует на магнитную стрелку. Опыт Эрстеда явился прямым доказательством взаимосвязи электричества и магнетизма: *электрический ток оказывает магнитное действие*. Покоящиеся заряды на магнитную стрелку не действуют. Следовательно, *магнитное поле порождается движущимися зарядами*.

В плоскости, перпендикулярной проводнику с током, железные опилки ④ и магнитные стрелки ⑤ располагаются по касательным к концентрическим окружностям. Пространственная ориентация опилок и стрелок изменяется на противоположную (на 180°) при изменении направления тока в проводнике ⑥. Следовательно, в пространстве, окружающем проводник с электрическим током, возникает поле, называемое магнитным.

Индукция магнитного поля $\vec{B}$ — векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле ⑦.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением северного полюса свободной магнитной стрелки в данной точке. Для определения направления вектора магнитной индукции поля, созданного вокруг проводника с током, следует использовать любое из приводимых ниже правил.

Правило буравчика (правого винта, штопора) для прямого тока ⑧: Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости движения конца его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этой точке.

С помощью правила буравчика определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в произвольной точке А.

Правило правой руки для прямого тока ⑨:

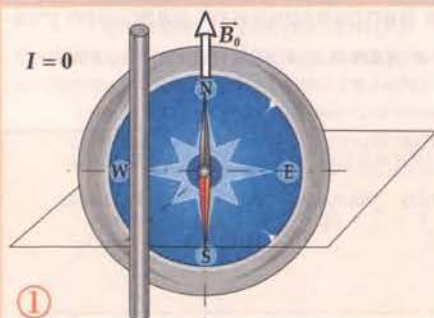
Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление индукции в этой точке.

С помощью правила правой руки определяется направление вектора индукции магнитного поля, созданного прямым током в точке А.

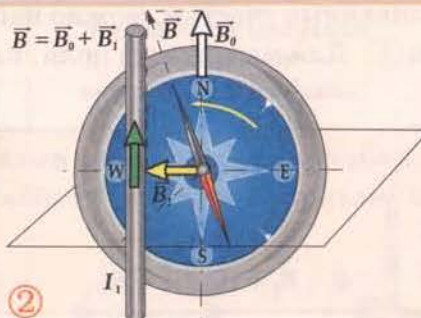
Линии индукции магнитного поля для прямого проводника с током являются концентрическими окружностями с центром на оси проводника, лежащими в плоскостях, перпендикулярных проводнику.

ОПЫТ ЭРСТЕДА

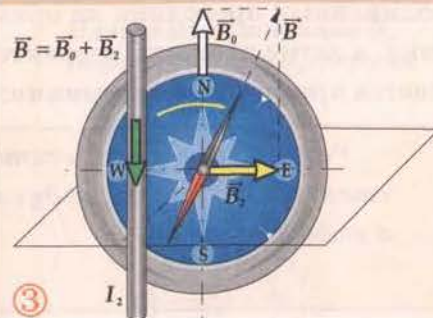
Магнитная стрелка в отсутствие тока



Поворот магнитной стрелки при направлении тока вверх



Поворот магнитной стрелки при направлении тока вниз

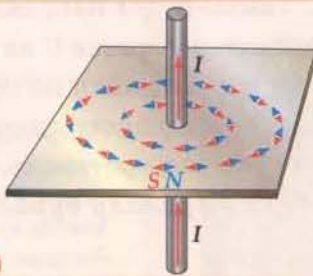


МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ПЛОСКОСТИ

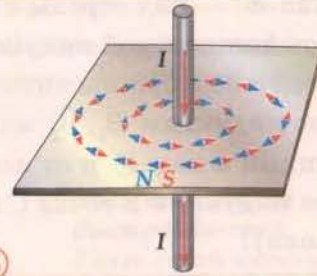
Упорядоченное расположение железных опилок



Ориентация магнитных стрелок

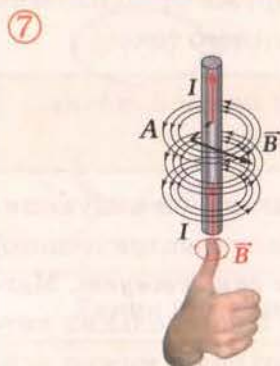


Изменение ориентации магнитных стрелок при смене направления тока



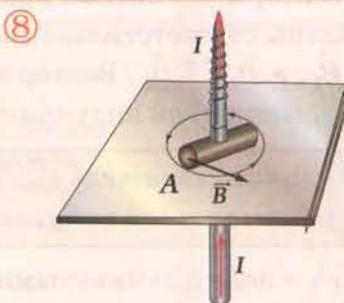
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Направление вектора магнитной индукции в разных горизонтальных плоскостях



Магнитное поле убывает с увеличением расстояния от проводника с током

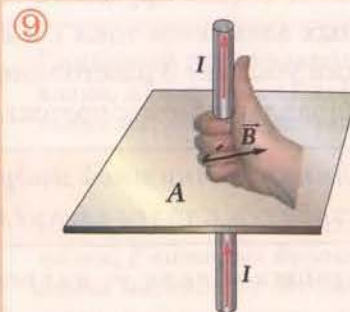
Правило буравчика



Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ – векторная физическая величина, характеризующая магнитное поле.

“Если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление скорости движения его рукоятки в данной точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$ в этой точке”

Правило правой руки



“Если охватить проводник правой рукой, направив отогнутый большой палец по направлению тока, то кончики остальных пальцев в данной точке покажут направление вектора индукции в этой точке”

§11. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Правило буравчика, как и правило правой руки, позволяют находить направление вектора индукции магнитного поля, созданного только прямым током. Однако мысленно разделив криволинейный проводник на прямолинейные участки, можно найти направление от каждого участка, а затем сложить эти векторы ^①. Для магнитного поля, как и для электрического, выполняется **принцип суперпозиции**:

Результирующий вектор индукции магнитного поля в данной точке складывается из векторов индукции магнитного поля, созданного различными токами в этой точке:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

С помощью принципа суперпозиции найдем направление вектора магнитной индукции в нескольких точках вблизи кольцевого тока. В центре в точке O все прямолинейные участки (1, 2, 3, 4) кольцевого тока создают магнитное поле, индукция которого по правилу буравчика направлена от нас (перпендикулярно плоскости кольца). Этому направлению соответствует обозначение $\otimes$ — вид стрелы с оперения. Также будет направлен в центре кольца вектор результирующей магнитной индукции. В произвольной точке C на оси кольца ^② направление результирующего вектора магнитной индукции можно найти по принципу суперпозиции, складывая попарно индукции $\vec{B}_1, \vec{B}_2$ магнитного поля, созданного элементарными прямыми токами, протекающими к нам $\odot$ и от нас $\otimes$ в диаметрально противоположных точках 1 и 2. Направление вектора индукции в точке C можно найти **по правилу буравчика для витка с током (кольцевого тока)**:

Если вращать рукоятку буравчика по направлению тока в витке, то поступательное перемещение буравчика совпадает с направлением вектора индукции магнитного поля, созданного током в витке на своей оси.

В точке D (вне кругового тока) ^③ векторы магнитной индукции от диаметрально противоположных элементов тока 1 и 2 направлены соответственно вверх $\vec{B}_1$ и вниз $\vec{B}_2$. Учитывая, что индукция убывает с расстоянием, $B_2 > B_1$, а $\vec{B}_D \uparrow \vec{B}_2$. Вектор индукции снаружи от кольцевого тока направлен противоположно вектору магнитной индукции внутри кольцевого тока ^④.

Линии магнитной индукции — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.

Магнитное поле — вихревое поле — поле с замкнутыми линиями магнитной индукции, не имеющими начала и конца. Это означает, что **магнитное поле** (в отличие от электрического) **не имеет источников: магнитных зарядов** (подобных электрическим) **не существует**. Магнитное поле более сложных конфигураций тока (двух витков ^⑤, катушки из нескольких витков ^⑥, U-образного магнита ^⑦), предназначенных для усиления магнитного поля, можно найти по принципу суперпозиции. Французский ученый **Андре Ампер** выдвинул гипотезу, что

магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него.

Подобие линий индукции постоянного полосового магнита ^⑧ и катушки с током наглядно подтверждает эту гипотезу. Магнитное поле Земли ^⑨ напоминает поле полосового магнита: северный полюс N магнита подобен Южному полюсу Земли.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Магнитное поле кольцевого тока

Принцип суперпозиции
Результирующий вектор магнитной индукции в данной точке складывается из векторов магнитной индукции, созданной в этой точке различными токами:

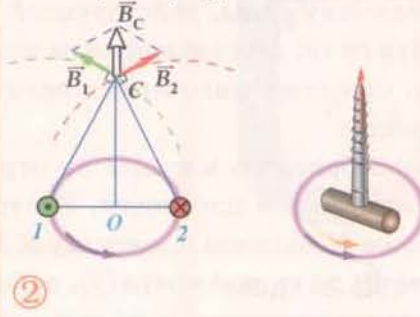
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_N$$



Индукция в центре витка (т. О)

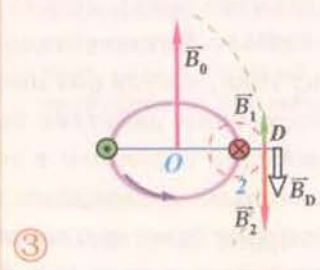
Индукция на оси витка (т. С)

Направление индукции $\vec{B}_C$ определяется по правилу буравчика



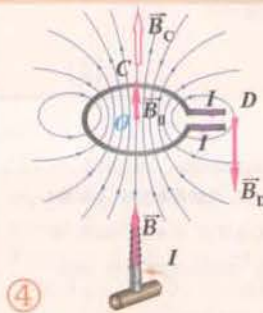
Индукция вне витка (т. D)

Направления индукции $\vec{B}_0$ внутри витка и $\vec{B}_D$ снаружи - противоположны



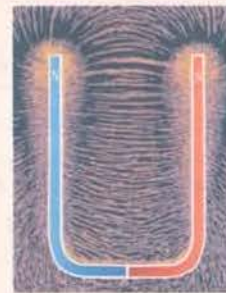
ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Виток с током



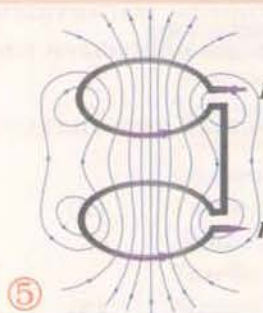
Линии магнитной индукции – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этой точке

Постоянный U-образный магнит



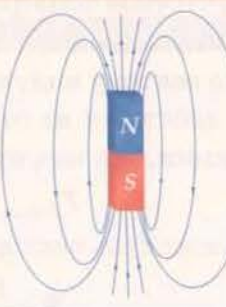
Железные опилки выстраиваются вдоль линий индукции магнитного поля

Линии индукции магнитного поля для двух витков



Линии магнитной индукции всегда замкнуты: они не имеют начала и конца

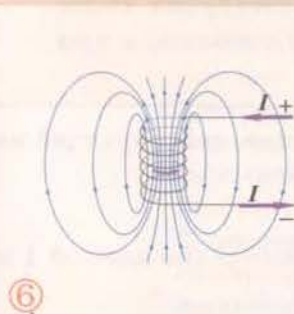
Постоянный полосовой магнит



Северный полюс магнита – полюс, из которого выходят линии магнитной индукции

Южный полюс магнита – полюс, в который входят линии магнитной индукции

Линии индукции катушки с током



Магнитное поле – вихревое поле, т.е. поле с замкнутыми линиями магнитной индукции

Магнитное поле Земли



Линии индукции магнитного поля Земли подобны линиям индукции полосового магнита

§12. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Магнитное поле действует на магнитную стрелку. Согласно гипотезе Ампера внутри вещества, из которого изготовлена стрелка, циркулируют элементарные электрические токи. Поэтому для изучения свойств магнитного поля целесообразно изучить его действие на проводник с током. Зная направление и величину силы, действующей на каждый малый отрезок проводника (элемент тока), можно найти силу, действующую на весь проводник.

В 1820 г. Ампер установил, от каких физических величин зависит сила, действующая на элемент тока, и куда она направлена.

Рассмотрим действие подковообразного магнита на отрезок проводника длиной Δl , который свободно подвешен в горизонтальной плоскости. Вектор магнитной индукции направлен горизонтально от северного полюса N магнита к южному S . Если направление тока в проводнике составляет угол α с вектором $\vec{B}$, то сила Ампера ①, действующая на элемент тока I длиной Δl , определяется **законом Ампера**:

Сила, с которой магнитное поле действует на помещенный в него отрезок проводника с током, равна произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины отрезка проводника и синуса угла между направлениями тока и магнитной индукции:

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha. \quad (1)$$

Направление силы Ампера определяет **правило левой руки** ②:

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника.

Сила Ампера перпендикулярна как направлению тока, так и вектору магнитной индукции.

Опыт показывает, что в отсутствие тока ($I = 0$) в проводнике сила со стороны магнитного поля (сила Ампера) на проводник не действует. Она также отсутствует, если ток направлен параллельно или антипараллельно вектору индукции $\vec{B}$ ③.

Максимальная сила $F_{A\max}$ действует на отрезок проводника, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции, так как при $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$ ④:

$$F_{A\max} = IB\Delta l. \quad (2)$$

Из формулы (2) можно найти модуль вектора магнитной индукции:

$$B = \frac{F_{A\max}}{I\Delta l}. \quad (3)$$

Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину проводника.

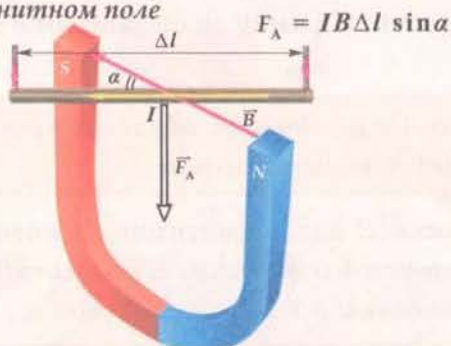
Модуль вектора магнитной индукции численно равен максимальной силе, действующей на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А.

Единица магнитной индукции — **тесла** (1 Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$.

Магнитная индукция однородного поля равна 1 Тл, если на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила 1 Н.

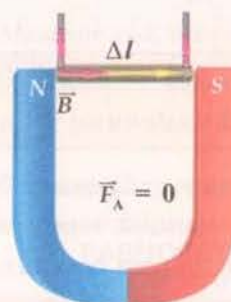
ЗАКОН АМПЕРА

- ① Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле



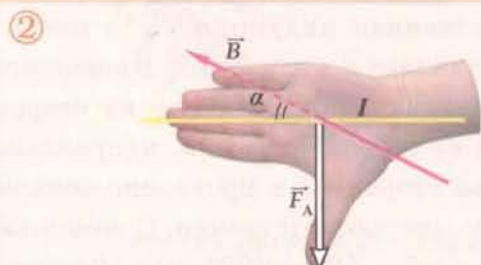
ПРОВОДНИК С ТОКОМ В ПЛОСКОСТИ МАГНИТА

- ③ $\alpha = 0$ ($\sin \alpha = 0$)



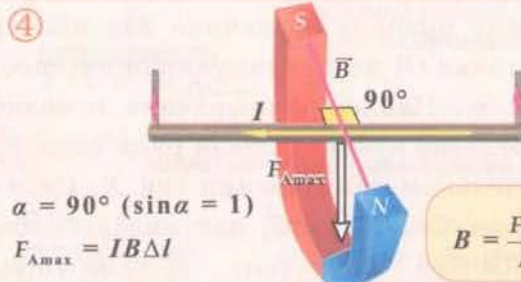
Если направление тока совпадает с направлением вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, сила Ампера на проводник не действует

ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ



“Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление тока в проводнике, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на отрезок проводника.”

МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



$\alpha = 90^\circ$ ($\sin \alpha = 1$)
 $F_{Amax} = IB\Delta l$

$B = \frac{F_{Amax}}{I\Delta l}$

Модуль магнитной индукции – физическая величина, равная отношению максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину отрезка проводника.

Единица магнитной индукции – тесла (1 Тл)

$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н/А} \cdot \text{м}$

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Источник	Индукция, Тл
Межзвездное пространство	10^{-10}
Тело человека	$3 \cdot 10^{-10}$
Холодильник (50 Гц)	10^{-6}
Солнечный свет	$3 \cdot 10^{-6}$
Тостер (50 Гц)	$3 \cdot 10^{-5}$
Линия электропередачи, поле Земли	$5 \cdot 10^{-5}$
Телевизор (50 Гц)	10^{-4}
Миксер	$3 \cdot 10^{-4}$
Юпитер (у полюсов)	$8 \cdot 10^{-4}$
Фен (50 Гц)	10^{-3}
Солнце (на поверхности)	10^{-2}
Полосовой магнит (вблизи полюсов)	10^{-2}
Керамический магнит	$2 \cdot 10^{-2}$
Предельное магнитное поле при длительном воздействии на человека	0,2
Солнечное пятно	0,3
Электромагнит (лабораторный)	5
Щадящее магнитное воздействие на бактерии и мышей	14
Сверхпроводник	40
Нейтронная звезда (на поверхности)	10^8
Атомное ядро (на поверхности)	10^{12}

§13. РАМКА С ТОКОМ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Выясним, как действует на прямоугольную проволочную рамку со сторонами a и b , по которой протекает сила тока I ,

однородное магнитное поле — поле, для которого в некоторой области пространства вектор магнитной индукции $\vec{B}$ можно считать постоянным ①.

Выберем декартову систему координат X, Y, Z с осью Z вдоль индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля и осью X , проходящей через середины сторон 1 и 3 рамки. В результате поворота рамки вокруг оси X плоскость рамки составляет с плоскостью XY некоторый угол α .

Собственная индукция — индукция магнитного поля, созданного током, протекающим по рамке.

Согласно правилу буравчика для контурного тока собственная индукция $\vec{B}_0$ в центре рамки (в точке O) перпендикулярна плоскости рамки и составляет с индукцией $\vec{B}$ внешнего поля угол α . Найдем направления и величины сил, действующих на каждую из сторон рамки. Согласно правилу левой руки сила $\vec{F}_1$, действующая на сторону 1 рамки, направлена в положительном направлении оси X . Сила $\vec{F}_3$ действует на сторону 3 в противоположном направлении. Силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$ направлены против оси Y и вдоль нее соответственно. С помощью закона Ампера получаем: $F_1 = IBa \sin(90^\circ + \alpha) = IBa \cos \alpha$, $F_3 = IBa \sin(90^\circ - \alpha) = IBa \cos \alpha$, $F_2 = F_4 = IBb$.

Силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$ лишь растягивают рамку. Пара сил $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_4$ стремится повернуть рамку вокруг оси X в направлении, показанном голубой стрелкой. Это означает, что их моменты относительно оси X ②:

$$M_2 = F_2 \cdot OK = IBb(a/2) \sin \alpha \quad \text{и} \quad M_4 = F_4 \cdot OK = IBb(a/2) \sin \alpha$$

складываются.

Момент сил, действующих на рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле,

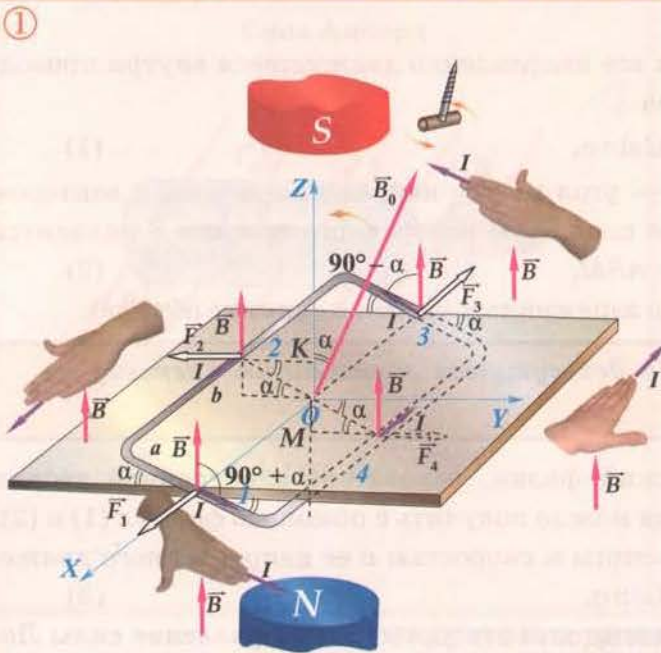
$$M = M_2 + M_4 = ISB \sin \alpha, \quad (1)$$

где S — площадь рамки ($S = ab$). Вращающий момент не действует на рамку ($M = 0$) в двух случаях: когда угол между собственной и внешней индукцией $\alpha = 0$ ③ и когда $\alpha = 180^\circ$ ④. В первом случае равновесие рамки — устойчиво, во втором — неустойчиво.

Витком тока является орбита электрона в атоме ⑤. Вращению электрона вокруг ядра со скоростью v_e соответствует ток I , протекающий в противоположную сторону. При включении внешнего магнитного поля плоскость орбиты атома выстраивается перпендикулярно направлению внешней индукции ⑥. Поворот рамки с током в магнитном поле используют в электроизмерительных приборах ⑦.

В электродвигателе постоянного тока рамка с током, находящаяся в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси к положению устойчивого равновесия. При прохождении этого положения коллектор изменяет направление тока в рамке на противоположное. В результате положение рамки становится вновь неустойчивым, и она по инерции продолжает вращение в прежнем направлении ⑧.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РАМКУ С ТОКОМ



$$F_1 = Iba \sin(90^\circ + \alpha) = Iba \cos \alpha$$

$$F_3 = Iba \sin(90^\circ - \alpha) = Iba \cos \alpha$$

$$F_2 = F_4 = Ibb \sin 90^\circ = Ibb$$

ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ, ДЕЙСТВУЮЩИЙ НА РАМКУ С ТОКОМ

$$M_2 = F_2 \cdot OK; M_4 = F_4 \cdot OM$$

$$M_2 = M_4 = Ibb \frac{a}{2} \sin \alpha$$

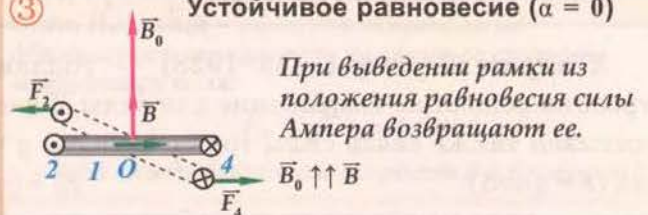
Момент сил, действующих на рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, равен

$$M = ISB \sin \alpha$$

S - площадь рамки ($S = ab$)

РАВНОВЕСИЕ РАМКИ С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

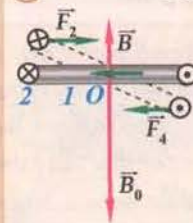
Устойчивое равновесие ($\alpha = 0$)



При выведении рамки из положения равновесия силы Ампера возвращают ее.

$$\vec{B}_0 \uparrow \uparrow \vec{B}$$

Неустойчивое равновесие ($\alpha = 180^\circ$)



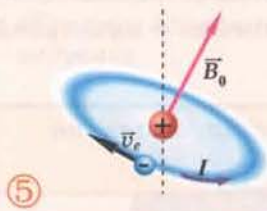
При выведении рамки из положения равновесия силы Ампера переводят ее в новое положение ($\alpha = 0$)

$$\vec{B}_0 \uparrow \downarrow \vec{B}$$

ОРБИТА ЭЛЕКТРОНА В АТОМЕ – ВИТОК С ТОКОМ

Плоскость орбиты электрона в отсутствие внешнего магнитного поля: $\vec{B} = 0$
($\vec{B}_0$ - собственная индукция)

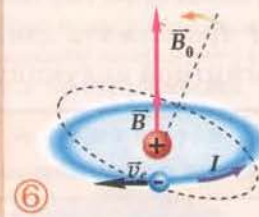
Ориентация плоскости орбиты электрона в атоме при $\vec{B} = 0$ произвольна



ОРИЕНТАЦИЯ ПЛОСКОСТИ ОРБИТЫ

Изменение положения плоскости орбиты электрона при помещении атома во внешнее магнитное поле $\vec{B}$.

В однородном магнитном поле замкнутый контур стремится установить так, чтобы направление его собственной магнитной индукции $\vec{B}_0$ совпало с направлением индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля



ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принципиальное устройство



Поворот катушки происходит до тех пор, пока $M_{\text{упр}} = M$:

$C\phi = INBS$, где ϕ - угол поворота рамки, N - число витков

$$I = \frac{C}{NSB} \cdot \phi$$

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принципиальная схема



Рамка, оказываясь в положении неустойчивого равновесия, поворачивается на 180° . Изменение коллектором направления тока на противоположное вновь поворачивает рамку

§14. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Со стороны однородного магнитного поля на все направленно движущиеся внутри проводника заряженные частицы действует сила Ампера ①:

$$F_A = IB\Delta l \sin \alpha, \quad (1)$$

где I — сила тока в проводнике длиной Δl , α — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В объеме V проводника площадью поперечного сечения S находится N частиц ②:

$$N = nV = nS\Delta l, \quad (2)$$

где n — концентрация заряженных частиц (число заряженных частиц в единице объема).

Сила Лоренца — сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля: $F_L = F_A / N$.

Хендрик Лоренц (1853–1928) — голландский физик, основатель электронной теории строения вещества. Выражение для силы Лоренца можно получить с помощью формул (1) и (2), учитывая также связь силы тока с зарядом q частицы и скоростью v ее направленного движения ($I = qnvS$):

$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (3)$$

где α — угол между скоростью $\vec{v}$ заряженной частицы и вектором $\vec{B}$. Направление силы Лоренца определяет *правило левой руки*:

Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца укажут направление скорости положительного заряда (или противоположное скорости отрицательного заряда), а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый (в плоскости ладони) на 90° большой палец покажет направление силы, действующей на данный заряд.

Траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле зависит от угла α между ее скоростью и вектором магнитной индукции. Рассмотрим два важных частных случая: $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$

1. Заряженная частица влетает в магнитное поле параллельно линиям магнитной индукции со скоростью $\vec{v}_{\parallel} \uparrow \vec{B}$ ③, ④. В этом случае $\alpha = 0$, $\sin \alpha = 0$, $F_L = 0$. В отсутствие силы Лоренца частица по инерции будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно с начальной скоростью $\vec{v}_{\parallel}$ вдоль линий магнитной индукции.

Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле параллельно линиям индукции, движется равномерно вдоль этих линий.

2. Заряженная частица влетает в магнитное поле со скоростью $\vec{v}_{\perp}$ перпендикулярно линиям магнитной индукции ⑤, ⑥. В этом случае $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, $F_L = qv_{\perp}B$. Сила Лоренца, перпендикулярная скорости, заставляет частицу массой m двигаться по окружности радиуса R , сообщая частице центростремительное ускорение $a_n = v_{\perp}^2 / R$. Из второго закона Ньютона $mv_{\perp}^2 / R = qv_{\perp}B$, следует, что

$$R = mv_{\perp} / (qB). \quad (4)$$

Заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности.

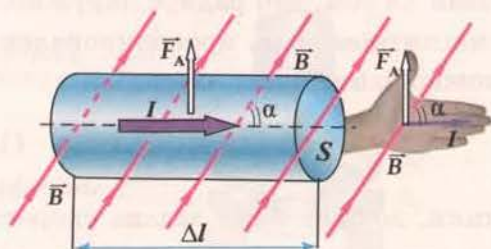
Направление вращения зависит от знака заряда.

Период обращения частицы по окружности $T = 2\pi R / v_{\perp} = 2\pi m / (qB)$.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ТОК И ЗАРЯД

①

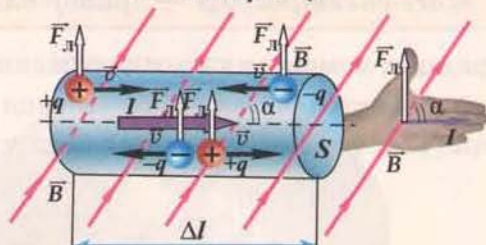
Сила Ампера



$$F_A = I \Delta l B \sin \alpha$$

②

Сила Лоренца



Число заряженных частиц в объеме проводника $N = n \Delta l S$, где n – концентрация заряженных частиц.

$$I = q n v S$$

Сила Лоренца – сила, действующая на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля:

$$F_L = \frac{F_A}{N} = q v B \sin \alpha$$

α – угол между вектором скорости $\vec{v}$ и вектором $\vec{B}$

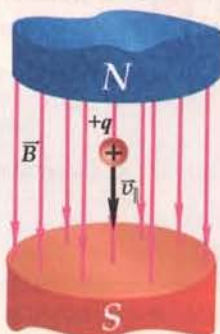
ПЛОСКИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

③

$$\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B} \quad (q > 0)$$

$$\alpha = 0$$

$$F_L = 0$$



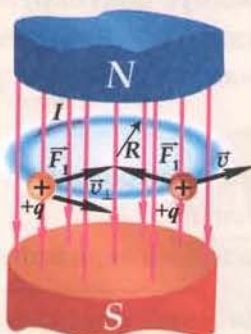
Положительно заряженная частица движется вдоль линий магнитной индукции

⑤

$$\vec{v} \perp \vec{B} \quad (q > 0)$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$F_L = q v_\perp B$$



Положительно заряженная частица, влетающая в однородное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции, движется в этой плоскости по окружности

Второй закон Ньютона для частицы:

$$m \frac{v_\perp^2}{R} = q v_\perp B$$

$$R = \frac{m v_\perp}{q B}$$

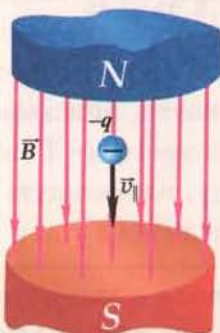
– циклотронный радиус

④

$$\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B} \quad (q < 0)$$

$$\alpha = 0$$

$$F_L = 0$$



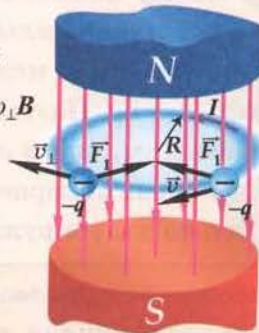
Отрицательно заряженная частица движется вдоль линий магнитной индукции

⑥

$$\vec{v} \perp \vec{B} \quad (q < 0)$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$F_L = q v_\perp B$$



Вращение отрицательного заряда по окружности в поперечном магнитном поле происходит в направлении, противоположном вращению положительного заряда

Период обращения частицы по окружности в поперечном магнитном поле

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = \frac{2\pi m}{q B}$$

не зависит от ее скорости

§15. МАСС-СПЕКТРОГРАФ. ЦИКЛОТРОН

Масс-спектрограф — прибор для измерения масс заряженных частиц ①.

Принцип измерения масс заряженных частиц основан на том, что радиус окружности, по которой движется заряженная частица в однородном магнитном поле, пропорционален массе частицы (§14, формула (4)). Зная радиус окружности, можно найти массу частицы:

$$m = \frac{qB}{v_{\perp}} R. \quad (1)$$

Если известны заряд частицы и магнитная индукция, должна быть задана скорость $v_{\perp}$, с которой частица влетает в магнитное поле. Источник заряженных частиц испускает частицы с различными скоростями. Диафрагмы D_1 и D_2 направляют частицы в фильтр скоростей, который выделяет частицы с определенной скоростью $v_{\perp}$. В фильтре скоростей заряженная частица попадает во взаимно перпендикулярные электрическое (с напряженностью $\vec{E}_0$) и магнитное (с индукцией $\vec{B}_0$) поля. На ион, движущийся между пластинами конденсатора, действуют в противоположных направлениях две силы: электрическая $F_K = qE_0$ и магнитная (сила Лоренца) $F_L = qv_{\perp}B_0$. Через диафрагму D_3 пройдут только те ионы, для которых эти силы уравновешены: $qE_0 = qv_{\perp}B_0$, т.е. ионы, обладающие скоростью $v_{\perp} = E_0 / B_0$. Ионы, движущиеся с другими скоростями, через фильтр не пройдут. По местоположению следа, который оставляют ионы на фотопластинке, находят радиус полуокружности, описываемой ионом под действием поперечного магнитного поля с индукцией B . Масса иона определяется по формуле (1):

$$m = \frac{qBB_0}{E_0} R. \quad (2)$$

С помощью подобных масс-спектрографов была определена масса всех химических элементов, обнаружены многие изотопы.

Для сообщения высоких энергий заряженным частицам используют ускорители.

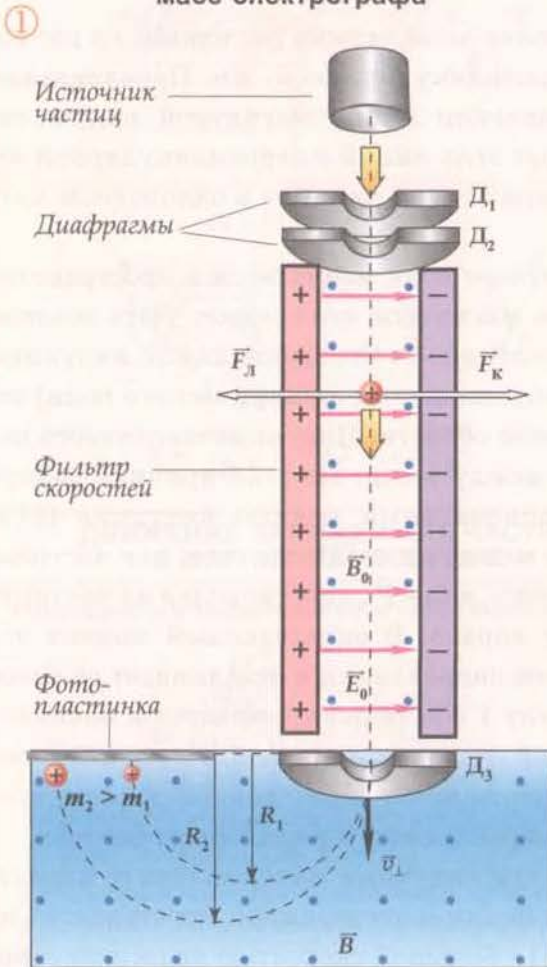
Циклотрон — циклический ускоритель заряженных частиц, в котором заряженные частицы движутся под действием электрического и магнитного полей по раскручивающейся спирали ②.

Рассмотрим процесс ускорения заряженных частиц до энергий, необходимых для бомбардировки частиц-мишеней ③. От источника И заряженная частица попадает в дуант 1 (пустотелый полуцилиндр, помещенный между полюсами сильного электромагнита) со скоростью v_1 , двигаясь по полуокружности под действием силы Лоренца в течение промежутка времени $T/2$. В момент времени $t = T/2$ электрическое поле между дуантами ускоряет положительный заряд, влетающий в дуант 2 со скоростью $v_2 > v_1$. Поэтому радиус полуокружности, описываемой частицей в дуанте 2, оказывается большим, чем в дуанте 1. В момент времени $t = T$ полярность электрического тока изменяется и вновь ускоряет заряженную частицу, влетающую в дуант 1 со скоростью $v_3 > v_2$ и движущуюся по полуокружности еще большего радиуса и т.д.

Ускорение частиц в циклотроне производит электрическое поле в зазоре между дуантами. Магнитное поле, закручивая частицы, делает ускоритель компактным.

МАСС-СПЕКТРОГРАФ

Принципиальная схема масс-спектрографа



$$F_L = qv_\perp B_0$$

$$F_K = qE_0$$

$$F_K = F_L$$

$$qE_0 = qv_\perp B_0$$

$$v_\perp = \frac{E_0}{B_0}$$

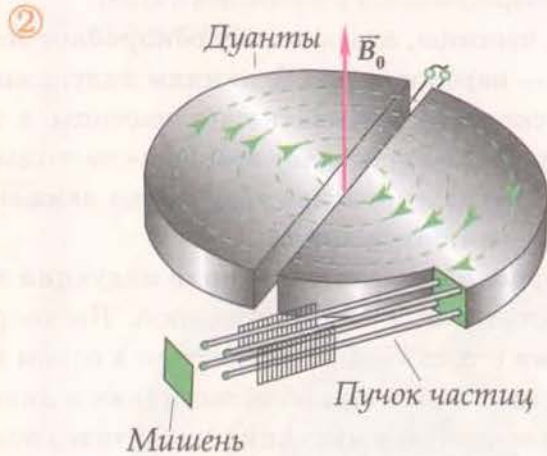
$$R = \frac{mv_\perp}{qB}$$

$$m = \frac{qBB_0}{E_0} \cdot R$$

Масс-спектрограф – прибор для измерения масс заряженных частиц

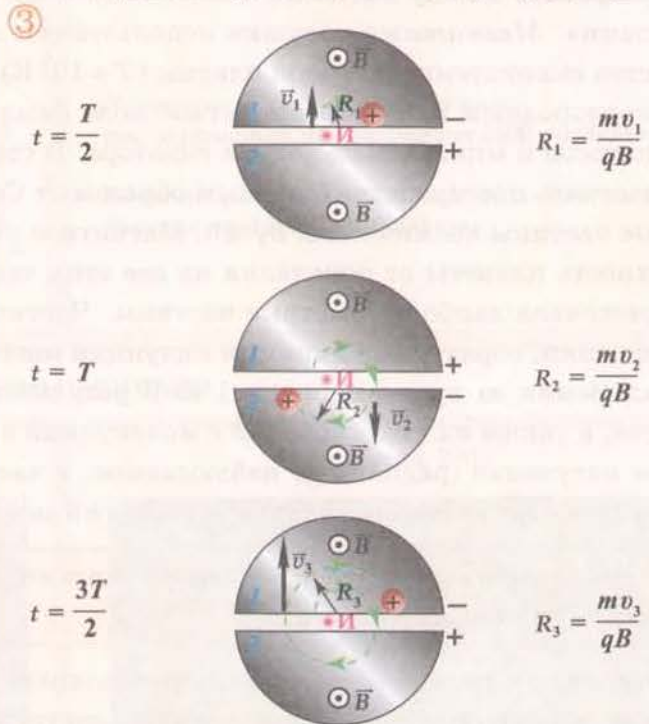
ЦИКЛОТРОН

Принципиальная схема циклотрона



Циклотрон – циклический ускоритель заряженных частиц, в котором они движутся под действием электрического и магнитного полей по раскручивающейся спирали. На последнем ее витке пучок быстрых заряженных частиц выводится наружу, бомбардируя частицы – мишени

Ускорение заряженных частиц в циклотроне



Электрическое поле в зазоре между дуантами ускоряет частицы. Магнитное поле в дуантах закручивает частицы, делая ускоритель более компактным

§16. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТРАЕКТОРИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Скорость частицы, влетающей в *однородное магнитное поле*, можно разложить на две составляющие — параллельную $\vec{v}_{\parallel}$ линиям индукции и перпендикулярную $\vec{v}_{\perp}$ им. Параллельная компонента скорости вызывает снос частицы в направлении линий магнитной индукции, а перпендикулярная определяет вращение частицы вокруг этих линий в перпендикулярной им плоскости ①. Результирующая траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле — *винтовая линия*.

В *неоднородном магнитном поле* индукция магнитного поля изменяется в пространстве как по величине, так и по направлению. Неоднородное магнитное поле может быть создано двумя витками с токами, протекающими в одном направлении ②. Сгущение линий индукции в какой-либо пространственной области (как и линий напряженности электрического поля) означает большее значение индукции магнитного поля в этой области. Индукция магнитного поля вблизи витков с током больше, чем в пространстве между ними. По этой причине радиус винтовой линии траектории частицы, обратно пропорциональный модулю индукции (§14, формула (4)), меньше вблизи витков, чем в пространстве между ними. После того, как частица, двигаясь вправо по винтовой линии, пройдет среднюю точку, сила $\vec{F}$, действующая на частицу, приобретает компоненту $\vec{F}_{\parallel}$, тормозящую ее движение вправо. В определенный момент эта компонента силы останавливает движение частицы в этом направлении и отталкивает ее влево к витку 1. При приближении заряженной частицы к витку 1 она также тормозится и начинает циркулировать между витками, оказавшись в магнитной ловушке, или между «магнитными зеркалами». *Магнитные ловушки* используются для удержания в определенной области пространства высокотемпературной плазмы ($T \approx 10^6$ К) при управляемом термоядерном синтезе.

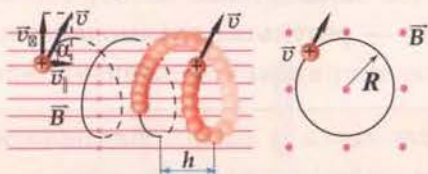
Неоднородным является магнитное поле Земли ③: его индукция максимальна у магнитных полюсов и минимальна вблизи экватора. В сторону Земли в околоземном пространстве из космического пространства (главным образом от Солнца) с большой скоростью движутся заряженные частицы космических лучей. Магнитное поле Земли как защитный пояс предохраняет поверхность планеты от попадания на нее этих частиц высокой энергии, изменяя их траектории, рассеивая наиболее быстрые частицы. Частицы с меньшей энергией попадают в магнитные ловушки, образуемые линиями индукции магнитного поля Земли, перемещаясь между полюсами Земли за время порядка 1 с. В результате торможения заряженных частиц вблизи полюсов, а также их столкновений с молекулами атмосферного воздуха возникает электромагнитное излучение (радиация), наблюдаемое, в частности, в виде полярных сияний ④. Спектральный состав излучения зависит от энергий заряженных частиц.

Радиационные пояса — области в атмосфере Земли с повышенной концентрацией заряженных частиц.

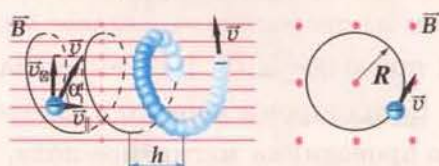
Во внешнем радиационном поясе, располагающемся на высоте от 12000 до 20000 км, большинство заряженных частиц составляют электроны. Протоны, обладающие большей массой, чем электроны, задерживаются лишь более сильным магнитным полем во внутреннем радиационном поясе на меньших высотах от 2400 до 6000 км.

① ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

$$B = \text{Const} \quad (q > 0)$$



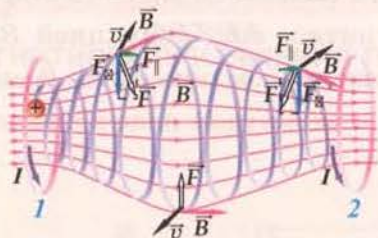
$$(q < 0)$$



$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}; \quad h = v_{\parallel}T = v_{\parallel} \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

② ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Неоднородное магнитное поле (два витка с током)

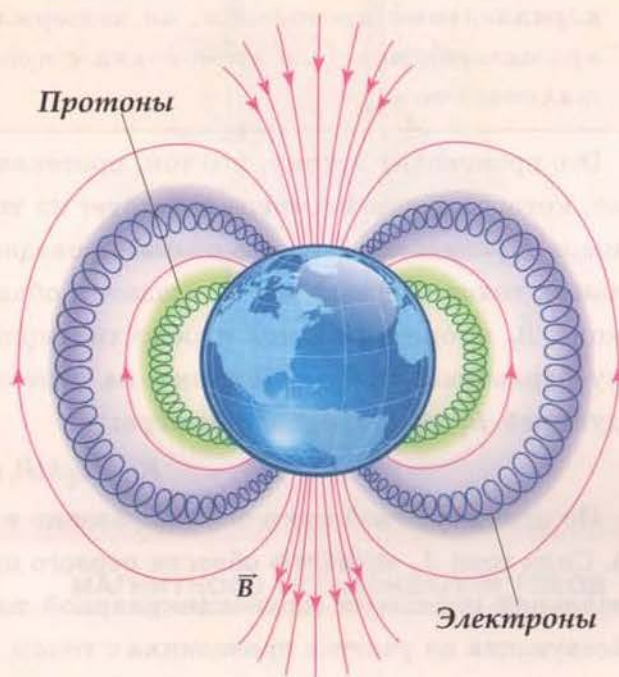


Заряженная частица тормозится, приближаясь к виткам 1 и 2, и начинает циркулировать между ними.

Магнитные ловушки используются для удержания в определенной области пространства высокотемпературной плазмы ($T \approx 10^6$ K) при управляемом термоядерном синтезе

③ РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ

Радиационные пояса – области в атмосфере Земли с повышенной концентрацией заряженных частиц



Внутренний радиационный пояс располагается на высоте от 2400 до 6000 км

Внешний радиационный пояс находится на высоте от 12000 до 20000 км

④

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Аляска, 2000



Норвегия, 2007



§17. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Магнитное поле действует на проводник с током с силой Ампера. С другой стороны, согласно гипотезе Ампера магнитные свойства тела определяются замкнутыми электрическими токами внутри него. Поэтому магнитное взаимодействие тел — результат взаимодействия электрических токов, протекающих в этих телах. Ампер продемонстрировал экспериментально, что

параллельные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются ①, а проводники с противоположно направленными токами отталкиваются ②.

Это происходит потому, что ток, протекающий в одном из проводников, создает магнитное поле, которое с силой Ампера действует на ток в другом проводнике ③. Найдем сначала силу Ампера $\vec{F}_{21}$, действующую на второй проводник с током I_2 со стороны первого в случае параллельных токов. Первый ток I_1 создает в области второго проводника магнитное поле. Его индукция $\vec{B}_1$ в горизонтальной плоскости (перпендикулярной второму току) направлена (по правилу буравчика) от нас. Поэтому на отрезок Δl второго проводника в магнитном поле с индукцией $\vec{B}_1$ действует сила Ампера:

$$F_{21} = I_2 \Delta l B_1 \sin 90^\circ = I_2 \Delta l B_1.$$

По правилу левой руки она направлена в горизонтальной плоскости влево (в сторону тока I_1). Сила тока I_2 создает в области первого проводника магнитное поле индукцией $\vec{B}_2$ в горизонтальной плоскости (перпендикулярной току I_1), направленной к нам. Сила Ампера $\vec{F}_{12}$, действующая на участок проводника с током I_1 длиной Δl , в магнитном поле с индукцией B_2 равна:

$$F_{12} = I_1 \Delta l B_2 \sin 90^\circ = I_1 \Delta l B_2.$$

По правилу левой руки сила $\vec{F}_{12}$ направлена в горизонтальной плоскости вправо (в сторону тока I_2). Таким образом, мы доказали, что параллельные проводники, по которым протекают токи в одном направлении, притягиваются.

По третьему закону Ньютона: $F_{21} = F_{12}$, или $I_2 \Delta l B_1 = I_1 \Delta l B_2$. Последнее равенство означает, что индукция магнитного поля, созданного первым током, пропорциональна силе тока I_1 , т.е. $B_1 \sim I_1$. Аналогично $B_2 \sim I_2$. Значит, сила взаимодействия проводников $F_{21} = F_{12} \sim I_1 I_2$. Опыты Ампера показали, что сила взаимодействия двух параллельных проводников длиной Δl , находящихся на расстоянии r друг от друга, по которым протекают силы тока I_1, I_2 ④

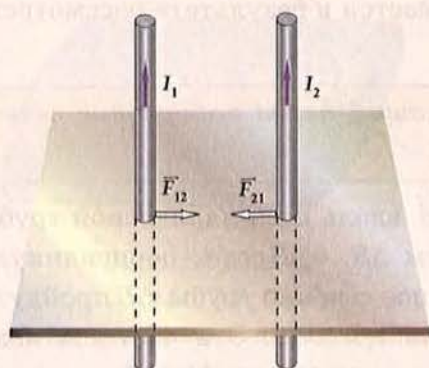
$$F_{21} = F_{12} = k_m I_1 I_2 \Delta l / r.$$

Коэффициент пропорциональности $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$. Единица силы тока — ампер.

1 А — сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным тонким проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

ПРЯЖЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

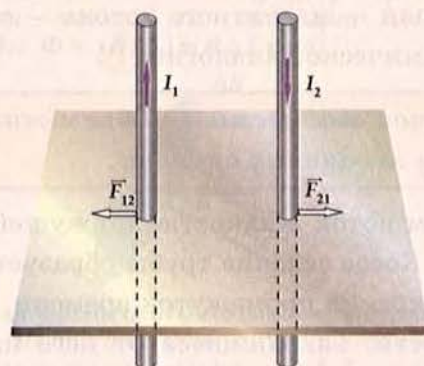
①



$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

ОТТАЛКИВАНИЕ АНТИПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

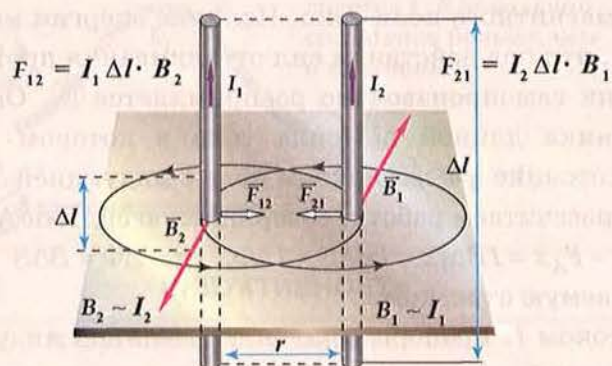
②



$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$$

ФИЗИКА МАГНИТНОГО ПРЯЖЕНИЯ ТОКОВ

③

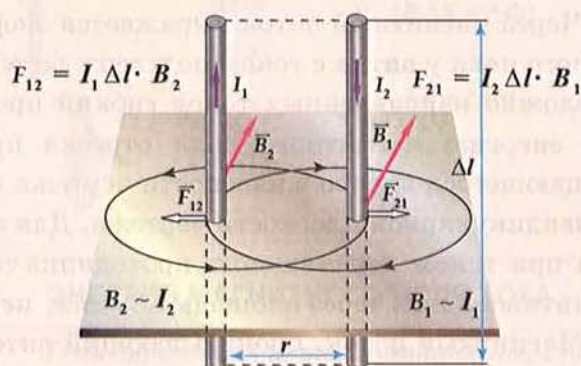


$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l, \quad k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$$

$$B = k_m \frac{I}{r}$$

ФИЗИКА МАГНИТНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ ТОКОВ

④



Ампер – сила постоянного тока, который, протекая по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенных в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом отрезке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н

§18. МАГНИТНЫЙ ПОТОК. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Понимание физического смысла и необходимости введения важной характеристики магнитного поля — магнитного потока — существенно облегчается в результате рассмотрения его гидродинамической аналогии ①.

Поток жидкости — объем жидкости, протекающий через поперечное сечение трубы за единицу времени.

Найдем поток жидкости, движущейся со скоростью $\vec{v}$ вдоль цилиндрической трубы сечением ΔS . Косое сечение трубы образует угол α с сечением $\Delta S_{\perp} = \Delta S \cos \alpha$, перпендикулярным оси цилиндра. За промежуток времени Δt сквозь поперечное сечение трубы ΔS пройдут частицы жидкости, находящиеся от него на расстоянии, меньшем $v\Delta t$. Эти частицы находятся в цилиндре объемом $\Delta V \Delta S_{\perp} v \Delta t$. Следовательно, поток жидкости (или поток вектора скорости) $\Phi_{\vec{v}} = v \Delta S \cos \alpha$. Часто вводится **вектор площади контура** $\vec{\Delta S}$, равный по модулю площади ΔS и направленный перпендикулярно площади по правилу буравчика для контурных токов. Необходимо лишь выбрать направление обхода контура, ограничивающего площадь. Тогда поток жидкости (или поток вектора скорости) определяется как скалярное произведение векторов $\vec{v}$ и $\vec{\Delta S}$: $\Phi_{\vec{v}} = (\vec{v}, \vec{\Delta S}) = v \Delta S \cos \alpha$. По аналогии

магнитный поток (поток магнитной индукции) через поверхность площадью ΔS — физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади ②: $\Phi = (\vec{B}, \vec{\Delta S}) = B \Delta S \cos \alpha$,

где α — угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{\Delta S}$. Единица магнитного потока — **вебер** (1 Вб).

Через магнитный поток выражается энергия магнитного поля тока. Наличие энергии магнитного поля у витка с током подтверждается тем, что под действием сил отталкивания противоположно направленных токов гибкий проводник самопроизвольно распрямляется ③. Оценим энергию магнитного поля отрезка проводника длиной Δl (сила тока в котором I), смещающегося вправо в плоскости чертежа на расстояние x в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, перпендикулярной плоскости чертежа. Для этого рассчитаем работу, совершаемую силами Ампера при таком перемещении проводника ④: $\delta A = F_A x = IB \Delta l x = IB \Delta S = I \Delta \Phi$, где $\Delta \Phi = B \Delta S$ — магнитный поток через площадь $\Delta S = \Delta l x$, пересекаемую отрезком.

Магнитный поток, пронизывающий виток с током I , пропорционален собственной индукции B : $\Phi \sim B$. Но $B \sim I$, значит, $\Phi \sim I$, или $\Phi = LI$, где L — индуктивность витка.

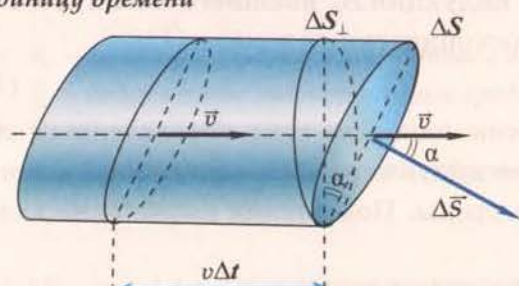
Индуктивность контура — физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника, и силой тока в контуре ⑤.

Единица индуктивности — **генри** (1 Гн). С помощью графика линейной зависимости $\Phi(I)$ можно найти элементарную работу при изменении силы тока в контуре на ΔI ⑥: $\delta A = I \Delta \Phi = LI \Delta I$. На графике δA — площадь трапеции с высотой ΔI и со средней линией LI_1 . Суммарная работа и энергия магнитного поля в контуре определяется площадью прямоугольного треугольника со сторонами LI и I :

$$A = W_m = LI^2 / 2.$$

1 ПОТОК ЖИДКОСТИ

Поток жидкости – объем ΔV_1 жидкости, протекающей сквозь поперечное сечение трубы за единицу времени



$$\Delta V_1 = \Delta S v \Delta t, \quad \Delta S_{\perp} = \Delta S \cos \alpha$$

Поток жидкости (или поток вектора скорости)

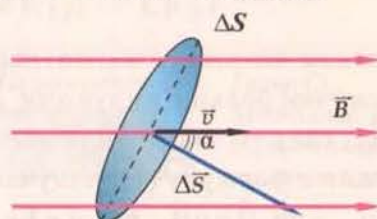
$$\Phi_v = \Delta V_1 = v \Delta S \cos \alpha$$

или

$$\Phi_v = (\vec{v} \Delta \vec{S})$$

2 МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитный поток (поток магнитной индукции) – через поверхность площадью ΔS – физическая величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор площади: $\Phi = (\vec{B} \Delta \vec{S}) = B \Delta S \cos \alpha$

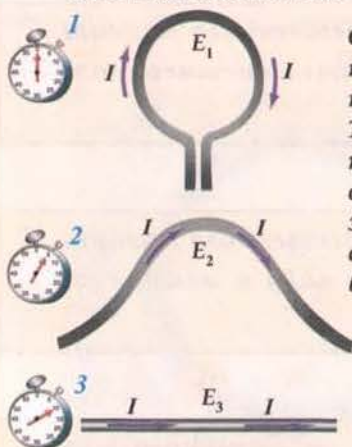


Единица магнитного потока – вебер (1 Вб).

1 Вб – магнитный поток, созданный однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции

3 ЭНЕРГИЯ ВИТКА С ТОКОМ

Распрямление витка с током в результате действия магнитных сил

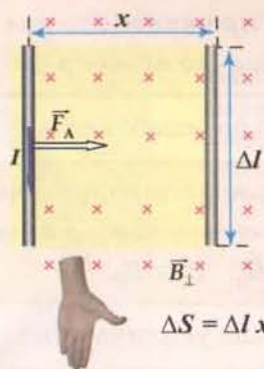


Самопроизвольный переход проводника из начального состояния 1 в конечное 3 (через промежуточное 2) означает, что его энергия E_1 в начальном состоянии больше, чем в конечном E_3

$$E_1 > E_2 > E_3$$

4 РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ СИЛОЙ АМПЕРА

Работа силы Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле



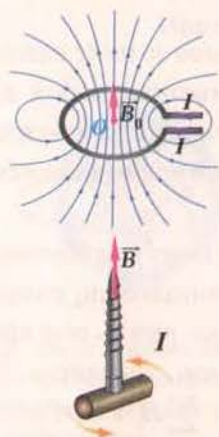
$$\delta A = F_A x = IB \Delta l x$$

$$\delta A = IB \Delta S, \quad (B \Delta S = \Delta \Phi)$$

$$\delta A = I \Delta \Phi$$

5 ИНДУКТИВНОСТЬ

Индуктивность контура с током



$$\Phi \sim B; \quad B \sim I$$

$$\Phi = LI$$

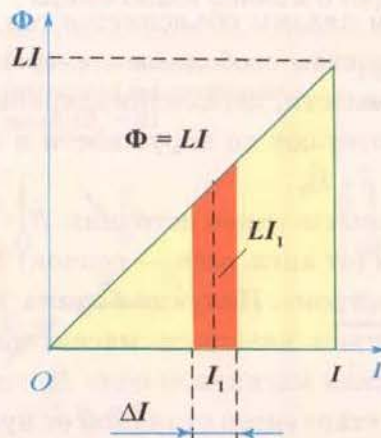
L – индуктивность витка.

Индуктивность контура – физическая величина, равная коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком через площадь, ограниченную контуром проводника и силой тока в контуре.

Единица индуктивности – генри (1 Гн)

6 ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Геометрическая интерпретация энергии магнитного поля контура с током



$$\delta A = I \Delta \Phi, \quad (\Delta \Phi = L \Delta I)$$

$$\delta A = LI \Delta I$$

$$A = \frac{LI^2}{2}$$

Энергия магнитного поля тока I

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

§19. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. ДИА- И ПАРАМАГНЕТИЗМ

Магнитная индукция $\vec{B}$ в среде складывается из индукции $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля и собственной индукции $\vec{B}_c$ вещества, созданной микроскопическими токами (1):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c. \quad (1)$$

Под действием внешнего магнитного поля микроскопические токи определенным образом ориентируются: чем больше индукция $\vec{B}_0$, тем больше индукция собственного магнитного поля среды: $\vec{B}_c = \chi \vec{B}_0$, где χ — магнитная восприимчивость среды. Подставляя выражение для собственной индукции в формулу (1), получаем:

$$\vec{B} = (1 + \chi) \vec{B}_0, \text{ или } \vec{B} = \mu \vec{B}_0, \text{ где } \mu = 1 + \chi \text{ — магнитная проницаемость среды.}$$

Магнитная проницаемость среды — физическая величина, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме: $\mu = B / B_0$.

Разная магнитная проницаемость веществ определяет различие их магнитных свойств. Существует три основных класса веществ с резко отличающимися магнитными свойствами: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля направлен противоположно вектору магнитной индукции внешнего поля и значительно меньше его по модулю (2): $\vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}_0$, $B_c \ll B_0$ —

внешнее поле незначительно ослабляется.

Парамагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля сонаправлен вектору магнитной индукции внешнего поля и меньше его по модулю (3): $\vec{B}_c \uparrow \uparrow \vec{B}_0$, $B_c < B_0$ —

внешнее поле незначительно усиливается.

Ферромагнетик — вещество, у которого вектор индукции собственного магнитного поля сонаправлен вектору магнитной индукции внешнего поля и значительно больше его по модулю (4): $\vec{B}_c \uparrow \uparrow \vec{B}_0$, $B_c \gg B_0$ —

внешнее поле значительно усиливается.

Диамагнетизм плазмы объясняется тем, что внешнее поле $\vec{B}_0$, приложенное к ней, закручивает по окружностям свободные электроны и положительные ионы в противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной $\vec{B}_0$ (5). Токи I_+ и I_- , соответствующие движению этих зарядов, протекают по окружности в одну сторону. Собственная индукция, создаваемая этими токами, $\vec{B}_c \uparrow \downarrow \vec{B}_0$.

В атомах парамагнетиков источник $\vec{B}_c$ — вращение валентного электрона вокруг собственной оси, или *спин* (от англ. spin — волчок) (6). Микроток I_s направлен противоположно скорости вращения электрона. Индукция спина $\vec{B}_s$ направлена по правилу буравчика вдоль оси вращения. В отсутствии внешнего магнитного поля расположение осей спинов хаотично (7): $\sum \vec{B}_s = 0$. Во внешнем магнитном поле $\vec{B}_0$ спины выстраиваются вдоль него (8): $\sum \vec{B}_s \neq 0$. Собственная индукция становится отличной от нуля и сонаправленной с внешней.

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СРЕДЫ

① Магнитная индукция в среде

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c,$$

где $\vec{B}_0$ – индукция внешнего магнитного поля,
 $\vec{B}_c$ – собственное магнитное поле среды

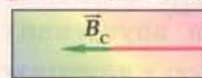
$$\vec{B}_c = \chi \vec{B}_0 \quad (\chi - \text{магнитная восприимчивость среды})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0 \quad (\mu = 1 + \chi - \text{магнитная проницаемость среды})$$

Магнитная проницаемость среды – физическая величина, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается от магнитной индукции внешнего (намагничивающего) поля в вакууме

ТИПЫ МАГНЕТИКОВ

② Диамагнетик



$$\chi < 0; |\chi| \ll 1, \mu \leq 1$$

Газы: H_2, CO_2, He, N .
 Металлы: Au, Ag, Cu, Bi .
 Стекло, вода, соль, резина, алмаз, дерево, плазма

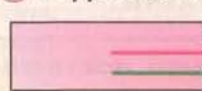
③ Парамагнетик



$$\chi > 0; |\chi| \approx 1, \mu \approx 2$$

Газы: O_2 .
 Металлы: Al, Pt, U .
 Щелочные и щелочноземельные

④ Ферромагнетик

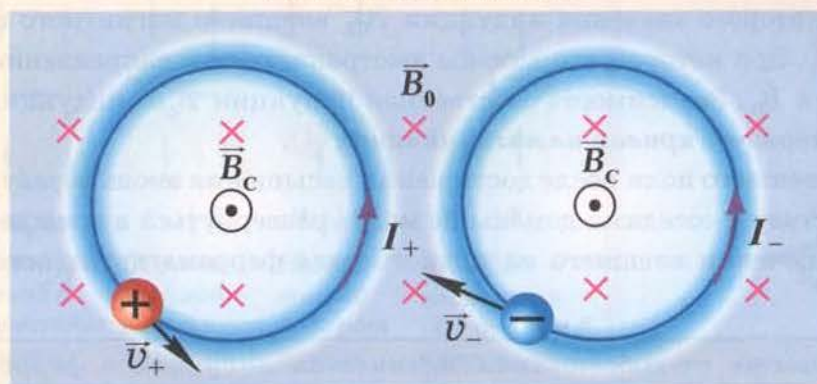


$$\chi > 0; |\chi| \gg 1, \mu \gg 1$$

Металлы: Fe, Co, Ni , их сплавы, редкоземельные элементы

ДИАМАГНЕТИЗМ

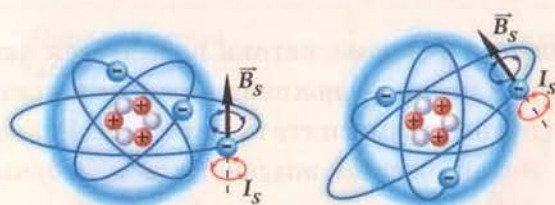
⑤ Диамагнетизм плазмы



Внешнее магнитное поле $\vec{B}_0$ закручивает электроны и ионы, создавая электрические токи. Собственная индукция $\vec{B}_c$, создаваемая этими токами, будет ослаблять внешнее магнитное поле $\vec{B}_0$

ПАРАМАГНЕТИЗМ

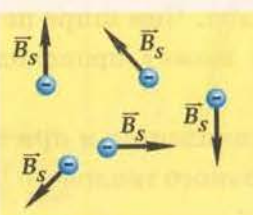
⑥ Парамагнетизм лития



В силу хаотичности расположения атомов результирующая собственная индукция в парамагнетике в отсутствие внешнего поля равна нулю

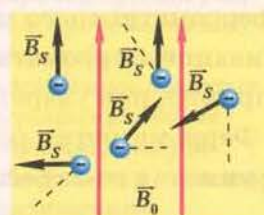
Ориентация спинов в парамагнетике

⑦ В отсутствие внешнего магнитного поля ($\vec{B}_0 = 0$)



$$\sum \vec{B}_s = 0$$

⑧ Во внешнем магнитном поле $\vec{B}_0$



$$\sum \vec{B}_s \neq 0$$

§20. ФЕРРОМАГНЕТИКИ

В атомах ферромагнетиков собственная индукция создается не только валентными электронами, но и электронами внутренних электронных оболочек. Это заметно увеличивает результирующую собственную индукцию атома. В результате взаимодействия атомов ферромагнетика энергетически выгодна параллельная ориентация спинов всех атомов. Однако ей препятствует магнитное взаимодействие спинов соседних атомов ①. Спин электрона атома 1 создает в области атома 2 магнитную индукцию $\vec{B}_1$, направленную против собственной индукции $\vec{B}_2$ и стремящуюся перевернуть спин 2. Однако взаимодействие атомов, вызывающее параллельную ориентацию спинов, оказывается сильнее. Переворот спина происходит, начиная с некоторого $N+1$ атома, в области которого N соседних атомов создали достаточную суммарную индукцию. Поэтому *ферромагнетик состоит из хаотически ориентированных доменов* (от франц. domaine — владение) — *областей размером порядка 0,5 мкм, в пределах которых спины всех атомов параллельны.*

В отсутствие внешнего магнитного поля собственная индукция в ферромагнетике равна нулю ②.

Если индукция B_{01} внешнего магнитного поля, приложенного к ферромагнетiku, невелика, происходит обратимый поворот доменов в направлении $\vec{B}_{01}$ и их рост. При выключении поля доменная структура восстанавливается. В более сильном поле $B_{02} > B_{01}$ поворот и рост доменов становится необратимым: начальная доменная структура не восстанавливается при выключении поля. Начиная с некоторого значения индукции B_{03} внешнего магнитного поля, возникает *явление насыщения* ③, при котором все домены выстраиваются в направлении индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}_0$. Зависимость собственной индукции $\vec{B}_c$ от индукции $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля характеризует *кривая намагничивания* ④.

При уменьшении индукции внешнего поля после достижения насыщения вновь образуются домены. Однако из-за взаимодействия с соседями домены не могут развернуться в прежнее положение. Даже при полном выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным.

Остаточная намагниченность — собственная магнитная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля.

Магнито-жесткие ферромагнетики — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность велика ⑤.

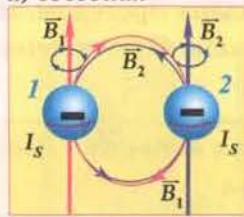
Магнито-мягкие ферромагнетики — ферромагнетики, у которых остаточная намагниченность мала ⑥.

Замкнутая кривая намагничивания и размагничивания ферромагнетика называется *петлей гистерезиса* (от греч. hysteresis — отставание). Форма петли — важнейшая характеристика ферромагнитного материала. Чем шире петля, тем труднее размагнитить материал. Размагничивание ферромагнетика может происходить при механическом воздействии на образец (например, при ударе).

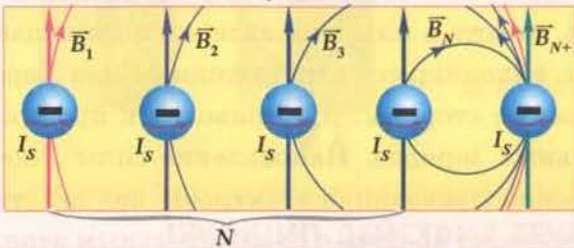
Ферромагнетик размагничивается и при сильном нагревании образца: доменная структура разрушается из-за беспорядочного теплового движения атомов.

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

① Магнитное взаимодействие спинов

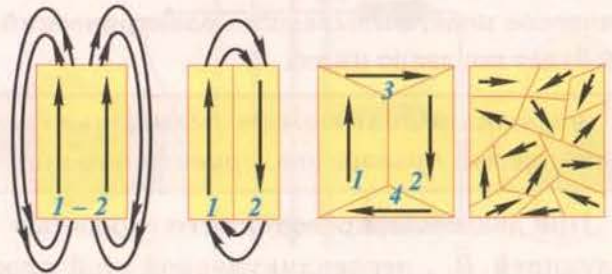


а) соседних



б) на значительных расстояниях

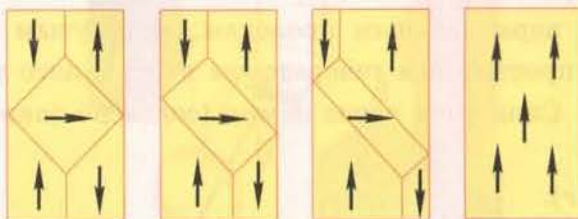
② Деление доменов



Собственная индукция в ферромагнетике в отсутствие внешнего магнитного поля равна нулю

ФЕРРОМАГНЕТИК ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

③ Изменение доменной структуры



$\vec{B}_0 = 0$

I $\vec{B}_{01}$

II $\vec{B}_{02}$

III $\vec{B}_{03}$

Структура доменов в отсутствие внешнего поля

Обратимый поворот и рост доменов

Необратимый поворот и рост доменов

Явление насыщения (все домены в направлении $\vec{B}_0$)

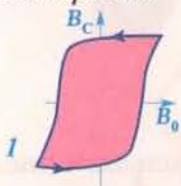
④ Кривая намагничивания



ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА

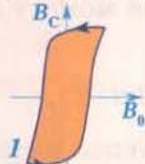
⑤ МАГНИТО-ЖЕСТКИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Широкая петля гистерезиса



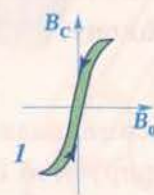
Применяются для изготовления постоянных магнитов из-за большой остаточной намагниченности

Узкая петля гистерезиса



Применяются для изготовления элементов памяти компьютеров, магнитных лент, кредитных карточек из-за высокой остаточной намагниченности и легкого перемагничивания

⑥ МАГНИТО-МЯГКИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКИ



Используются в устройствах (трансформаторах, электродвигателях), где требуется постоянное быстрое перемагничивание образца, которое облегчается из-за малой остаточной намагниченности