КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
Кафедра физики твердого тела

В.В. ПАРФЕНОВ, Н.В. БОЛТАКОВА

ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Методическое пособие к лабораторной работе

Казань 2014

УДК 537.311.4
ББК В373.3

Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 6 от 22 ноября 2014 года

Рецензент:
канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теоретической физики К(П)ФУ
Деминов Р.Г.

Парфенов В.В., Болтакова Н.В.
Изучение частотной зависимости магнитной восприимчивости
/ В.В. Парфенов, Н.В. Болтакова. – Казань: Казан. ун-т, 2014. – 15 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», спецпрактикум, «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2014
© Болтакова Н.В., 2014
© Казанский университет, 2014

Частотная зависимость магнитной восприимчивости

В большинстве радиоэлектронных устройств изделия из ферри– и ферромагнитных материалов используются в условиях либо высокочастотного, либо импульсного перемагничивания. При этом необходимо знание как самих величин электромагнитных параметров магнетиков на высоких частотах (эти параметры могут существенно отличаться от статических), так и динамики процессов перемагничивания. Здесь мы рассмотрим динамику перемагничивания для наиболее важного случая – когда перемагничивание осуществляется за счет движения доменной границы.

Чтобы понять механизм смещения, необходимо представлять, что при прохождении границы через какой-то участок объема образца в этом участке происходит поворот элементарных магнитных моментов. Этот поворот можно рассматривать как прецессию, частота которой естественно будет связана со скоростью движения границы. Следовательно, исследование механизма смещения границы можно свести к исследованию прецессионного движения, условий его возникновения, его частоты, затухания и т. д.

Пусть на 180°-ную доменную границу (плоскость xy) действует поле, направленное вдоль оси x, т.е. $H = H_x$ (рис. 1). В магнитном поле на намагниченность действует вращающий момент, равный $MH_x \sin\Phi$ (Φ – угол между $\vec{M}$ и H_x), который направлен перпендикулярно плоскости границы, т.е. не может повернуть магнитные моменты атомов вокруг оси z. Но он выводит вектор намагниченности $\vec{M}$ из плоскости xy. Появляется составляющая вектора намагниченности по оси z–M_z, что равносильно возникновению в месте расположения границы «эффективного размагничивающего поля»

$$H_{эфф} = -M_z / \mu_0,$$

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

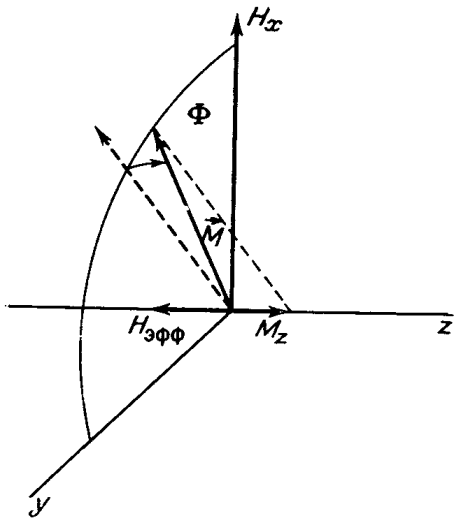

Рисунок 1. Силы, действующие на магнитный момент *M* во внешнем поле. Поле направлено по оси *x*, граница движется слева направо

Это поле вызовет вращение намагниченности вокруг оси *z* с угловой скоростью

$$\Omega = \mu_0 \Gamma H_{эфф}, \tag{1}$$

где Г – гиромагнитное отношение

$$\Gamma = -g\frac{e}{2m},$$

g − фактор Ланде.

С другой стороны, угловая скорость вращения магнитного момента связана со скоростью υ движения доменной границы по оси *z*:

$$\Omega = \frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{d\Phi}{dz}\right)\upsilon. \tag{2}$$

Из уравнений (1), (2) получим υ:

$$\upsilon = \mu_0 \Gamma H_{эфф}\left(\frac{d\Phi}{dz}\right)^{-1}, \tag{3}$$

т.е. скорость доменной границы тем больше, чем больше вектор намагниченности выходит из плоскости границы.

Вследствие того, что магнитные моменты атомов связаны с их моментами количества движения, движущаяся доменная граница обладает инерционными свойствами, а значит ей можно приписать определенную эффективную массу

$$m_W = \frac{1}{\mu_0 \Gamma^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\frac{d\Phi}{dz}\right)^2 dz, \tag{4}$$

которая, как следует из формулы (4), обратно пропорциональна толщине границы. Например, m_W для 180°-ной доменной границы в магнетите Fe_3O_4, составляет 10^{-10} г/см^2.

При включении внешнего поля доменная граница начинает двигаться равноускоренно до тех пор, пока энергия, получаемая границей от внешнего поля, не скомпенсируется проигрышем в магнитостатической энергии. После этого граница будет двигаться с постоянной скоростью υ, определяемой соотношением (3).

Это означает, что движение доменной границы тормозится эффективной силой $F_{тр} = \beta\upsilon$, аналогичной силе вязкого трения в механике. Коэффициент «магнитной вязкости»

$$\beta = \alpha\,\Gamma\,Mm_W = \left(\frac{\alpha\,M}{\mu_0\Gamma}\right)\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\frac{d\Phi}{d\,z}\right)^2 d\,z\,, \qquad (5)$$

где α – так называемый параметр затухания, имеющий для ферритов величину порядка 10^{-2}.

В хорошо проводящих магнетиках помимо потерь за счет вязкого затухания существенны потери на вихревые токи (токи Фуко). Для них коэффициент вязкости определяется следующим образом:

$$\beta' \sim 1/\rho, \qquad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление,

В металлах $\beta' >> \beta$, для большинства ферритов $\beta' << \beta$.

С учетом всего вышесказанного, уравнение движения доменной границы можно записать в стандартном виде

$$m_W\ddot{z} + \beta\,\dot{z} + k_W z = 2\,M_s H\,, \qquad (7)$$

где $k_W z$ – упругая сила, стремящаяся вернуть границу в исходное положение, M_s – намагниченность насыщения.

Если внешнее поле, действующее на образец, – гармоническое ($H = H_0\exp(i\omega t)$), то для смещения границы получим:

$$z = \frac{2\,M_s H_0}{k_W\left(1-\omega^2\dfrac{m_W}{k_W} + i\dfrac{\beta}{k_W}\omega\right)}\exp(i\omega t)\,, \qquad (8)$$

где i – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

t – время.

В первоначально размагниченном образце, то есть когда суммарная намагниченность всех доменов равна нулю, после смещения границы на

расстояние z, появится намагниченность $M = 2\,z\,M_s$. Магнитная восприимчивость χ будет определяться соотношением

$$\chi = \frac{M}{\mu_0 H} = \frac{2\,z\,M_s}{\mu_0 H} = \frac{4M_s^2}{\mu_0 k_W}\frac{1}{1-\omega^2\frac{m_W}{k_W}+i\frac{\beta}{k_W}\omega} = \chi' - i\chi''. \quad (10)$$

Здесь

$$\chi' = \chi_0 \frac{1-\omega^2\frac{m_W}{k_W}}{(1-\omega^2\frac{m_W}{k_W})^2+\frac{\beta^2}{k_W^2}\omega^2},$$

$$\chi_0 = \frac{4M_s^2}{\mu_0 k_W},$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\frac{\beta}{k_W}\omega}{(1-\omega^2\frac{m_W}{k_W})^2+\frac{\beta^2}{k_W^2}\omega^2}.$$

При малом затухании, т. е. когда $\beta^2 << k_W m_W$, поведение действительной χ' и мнимой χ'' частей магнитной восприимчивости будет описываться кривыми резонансного вида (11, 12) с резким ростом поглощения энергии внешнего поля при резонансной частоте $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_W}{m_W}}$ (рис. 2):

$$\chi' = \chi_0 \frac{1-\omega^2\frac{m_W}{k_W}}{(1-\omega^2\frac{m_W}{k_W})^2}, \quad (11)$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\frac{\beta}{k_W}\omega}{(1-\omega^2\frac{m_W}{k_W})^2}. \quad (12)$$

Этот случай отвечает ферромагнитному резонансу и наблюдается в совершенных, монокристаллических образцах при частотах порядка 10^8 Гц.

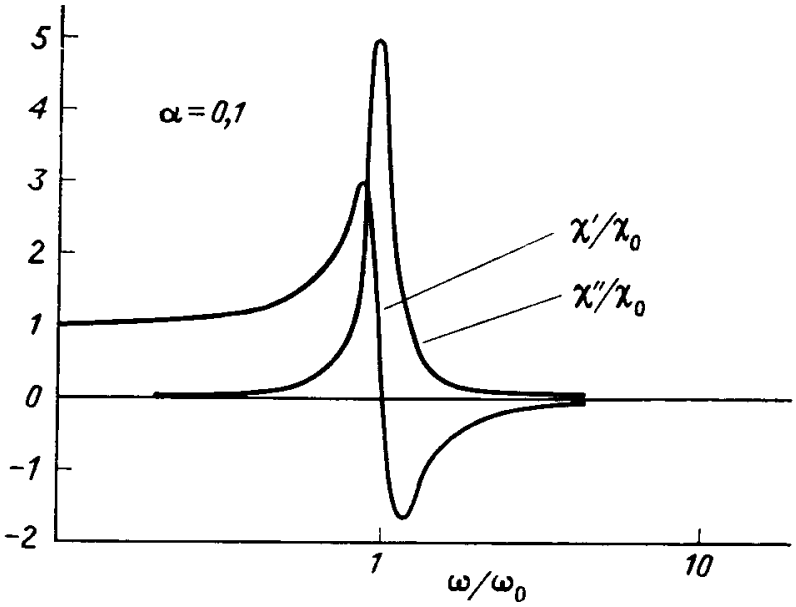

Рисунок 2. Резонансное поглощение электромагнитного излучения

Гораздо чаще наблюдается противоположная ситуация, когда затухание велико и

$$\chi' = \chi_0 \frac{1}{1 + \frac{\beta^2}{k_W^2}\omega^2},$$

$$\chi'' = \chi_0 \frac{\frac{\beta}{k_W}\omega}{1 + \frac{\beta^2}{k_W^2}\omega^2}. \qquad (13)$$

В этом случае наблюдаются частотные зависимости $\chi'(\omega)$ и $\chi''(\omega)$ «релаксационного» типа (рис. 3).

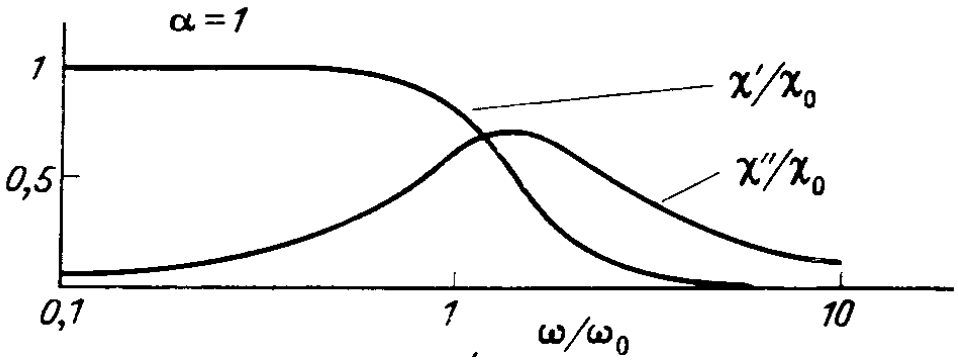

Рисунок 3. Кривые релаксационного типа

Аналогичную форму будут иметь и кривые частотных зависимостей действительной μ' и мнимой μ'' частей магнитной проницаемости, связанной с восприимчивостью χ известным соотношением

$$\mu = 1 + \chi. \qquad (14)$$

Таким образом, абсолютное значение магнитной проницаемости на высоких частотах перемагничивающего поля будет зависеть от частоты и величины коэффициента магнитной вязкости β.

На практике для характеристики магнитной вязкости и индукционных потерь обычно используется так называемый тангенс угла потерь

$$\mathrm{tg}\,\delta = \mu''/\mu'$$

или обратная ему величина – добротность

$$Q = 1/\,\mathrm{tg}\,\delta = \mu'/\mu''. \qquad (15)$$

Индукция B в образце, перемагничиваемом переменным магнитным полем, будет отставать по фазе от напряженности H поля на величину угла потерь

$$H = H_0 \exp(i\omega t),$$

$$B = B_0 \exp(i(\omega t - \delta)). \qquad (16)$$

Практически величину действительной и мнимой частей магнитной проницаемости в переменном электромагнитном поле определяют из измерений индуктивности L и добротности Q катушки, в качестве сердечника которой используется исследуемый образец. В случае тороидального образца индуктивность определяется соотношением

$$L = \mu'\mu_0 n^2 S/l, \qquad (17)$$

где n – число витков катушки;

S – площадь поперечного сечения сердечника катушки;

l – средняя длина магнитной линии в образце, значение которой зависит от соотношения наружного $r_н$ и внутреннего $r_в$ радиусов тороида:

$$l = \pi(r_н + r_в), \text{ при } r_н/r_в > 1{,}3, \qquad (18)$$

$$l = 2\pi\frac{r_Н - r_В}{\ln(r_Н/r_В)} \text{ при } r_н/r_в < 1{,}3. \qquad (19)$$

Значения индуктивности L и добротности Q измеряются с помощью мостов переменного тока, Q-метров и т.п. В данной работе предполагается измерить частотные зависимости добротности и индуктивности катушки с ферритовым тороидальным сердечником при помощи измерителя иммитанса.

Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения «эффективного размагничивающего поля».
2. Для чего вводится понятие эффективной массы доменной границы?
3. Что происходит с доменной границей при включении внешнего поля?
4. Для чего вводится коэффициент «магнитной вязкости» β?
5. Напишите уравнение движения доменной границы и его решение для случая гармонического внешнего поля, действующего на образец.
6. Запишите условие малого затухания.
7. В каком случае наблюдаются частотные зависимости $\chi'(\omega)$ и $\chi''(\omega)$ «релаксационного» типа?
8. Что такое тангенс угла потерь?
9. Как определяют практически величину действительной и мнимой частей магнитной проницаемости в переменном электромагнитном поле?

Описание установки

Внешний вид установки для измерения частотной зависимости магнитной восприимчивости приведен на рисунках 4-6.

Рисунок 4. Внешний вид установки для измерения частотной зависимости магнитной восприимчивости

Рисунок 5. Расположение органов управления на передней панели прибора для изучения частотной зависимости магнитной восприимчивости

а *б* *в*

Рисунок 6. Присоединительное устройство УП–1: внешний вид (*а*), вид с присоединенной перемычкой (*б*), вид с присоединенным исследуемым образцом (*в*)

Порядок выполнения работы

Перед тем, как приступить к выполнению работы, ознакомьтесь с теоретическими основами, необходимыми для понимания происходящих процессов.

Для выполнения работы понадобятся установка «Измеритель иммитанса Е7–20», присоединительное устройство УП–1, перемычка, исследуемый образец (рис. 4–6). Прежде чем включить установку, проверьте, что присоединительное устройство свободно. Все, используемые в работе кнопки, находятся на передней панели прибора, если не указано иное. Для выполнения работы следуйте нижеприведенному порядку действий.

1. Подключите установку к электросети, воткнув вилку в розетку. Переведите переключатель на задней стороне прибора в положение │ «», то есть включите прибор. При этом на табло появится надпись «ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНСА Е 7-20».

2. Откалибруйте прибор в режиме холостого хода. Для этого нажмите кнопку «>0<». При этом на табло в верхней строке слева появится надпись «>0< ХХ», означающая, что прибор находится в режиме холостого хода.

3. Нажмите кнопку «Ввод». После этого прибор начнет калибровку по всему частотному диапазону. Программа калибровки построена таким образом, что процесс начинается с 1 кГц, доходит с нарастающим шагом до 1 МГц, затем производится калибровка на нижних частотах – от 25 Гц до 1 кГц. В процессе калибровки на табло в строке индикации частот (третья строка в правой части экрана) будут изменяться значения частоты. Когда весь диапазон частот в указанной последовательности будет пройден, надпись «>0< ХХ» исчезнет, показания индикации во второй и третьей строках слева начнут мигать. Калибровка «холостого хода» закончена.

4. Откалибруйте прибор в режиме «короткого замыкания». Для этого замкните контакты присоединяемого устройства УП–1 перемычкой (рис. 6, *б*). Нажмите кнопку «>0<». При этом на табло в верхней строке слева появится надпись «>0< КЗ», означающая, что прибор находится в режиме короткого замыкания.

5. Повторите действия п. 3.

6. Уберите перемычку и подсоедините к УП–1 исследуемый образец (рис. 6, *в*).

7. Нажав кнопку «L», включите режим измерения индуктивности L и добротности Q. При этом в строке частот будет стоять значение 1 кГц.

8. Запишите 10 значений каждой величины в таблицы 1, 2. Нажмите кнопку «►», при этом значение частоты поменяется на следующее.

Таблица 1

Измеряемые и расчетные значения величин для построения зависимости μ'(ω)

№ изм.	f, кГц									
	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1										
2										
3										
4										
5										
6										
…										
10										
$\overline{L}$										
μ'										
ω, $с^{-1}$										

Таблица 2

Измеряемые и расчетные значения величин для построения зависимости μ"(ω)

№ изм.	f, кГц									
	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1										
2										
3										
4										
5										
6										
…										
10										
$\overline{Q}$										
μ"										
ω, $с^{-1}$										

9. Повторите действия п. 8 для диапазона частот 1–1000 кГц.

10. Выключите прибор переключателем на задней стороне, переведя его в положение «**О**». Выдерните из розетки вилку шнура подключения прибора.

11. Найдите среднее арифметическое для значений индуктивности $\overline{L}$ и добротности $\overline{Q}$ и занесите их в таблицы 1, 2.

12. Измерьте геометрические параметры исследуемого образца. По формуле (18) или (19) (в зависимости от геометрических параметров образца) найдите значение *l*.

13. Используя формулу (17) рассчитайте значение действительной части магнитной проницаемости μ' для каждой из частот *f*. Значения занесите в таблицу 2.

14. Используя формулу (16) рассчитайте значение мнимой компоненты магнитной проницаемости и μ'' для каждой из частот *f*. Значения занесите в таблицу 2.

15. Для каждого значения частоты *f* рассчитайте значения угловой частоты ω и занесите их в таблицы 1, 2.

16. Постройте графики частотной зависимости действительной и мнимой частей магнитной проницаемости (соответственно μ'(ω) и μ''(ω)).

Содержание отчета

Отчетом по работе должен содержать заполненные таблицы 1, 2 график зависимостей μ'(ω) и μ''(ω). При построении графиков для каждой точки должна быть графически указана погрешность. Следует проанализировать полученные результаты, основываясь на теоретических знаниях, освоенных перед выполнением лабораторной работы.

Литература

1. Крупичка, С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов [Текст]: Т. 2 / С. Крупичка; пер. с немецкого под ред. А. С. Пахомова; [предисл. ред. пер.]. Т. 2. – М.: Мир, 1976.

2. Физика магнетиков: практикум по физике твердого тела [Текст] / Сост. В. В. Парфенов, В. А. Чистяков. – Казань: Казанск. гос. ун-т, 1996.

3. Паршин, Д. А. Курс общей физики. Магнитостатика [Электронный ресурс] / Д. А. Паршин, Г. Г. Зегря. – С.-Пб: Учебно-методический центр кафедры экспериментальной физики СПбГПУ. – Режим доступа: http://lms.physics.spbstu.ru/course/view.php?id=56

Содержание

	стр.
Частотная зависимость магнитной восприимчивости ……...	3
Контрольные вопросы ……...	9
Описание установки …….....	9
Порядок выполнения работы ……...	11
Содержание отчета ……	13
Литература .....…….	13

Учебное издание

Парфенов Виктор Всеволодович,
Болтакова Наталья Викторовна

ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Методическое пособие к лабораторной работе

Рецензия

на методическое пособие «Изучение частотной зависимости магнитной восприимчивости», для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 011200.62, 03.03.02 «Физика», авторы профессор В.В. Парфенов, доцент Н.В. Болтакова,

Казань: КФУ, 2014 г. – 15 с.

В последние время в образовательных программах инженерно-технических направлений вузов всё больший упор делается на дисциплины, дающие основы практически применимых знаний. В этих условиях лабораторные занятия способствуют не только закреплению теоретических знаний, а еще и активизируют способность применять их на практике, формируют навыки работы с оборудованием.

Рецензируемое методическое пособие написано в соответствии с новыми требованиями, предъявляемыми к уровню знаний академического бакалавра. Данное методическое пособие характеризуется сочетанием простоты и четкости изложения с выборочным содержанием материала курса физики магнитных материалов. Этому во многом способствует достаточно стройная и логичная структура пособия. В пособии последовательно на современном научном и методическом уровне раскрывается такая важная тема, как частотная зависимость магнитной восприимчивости. В оглавлении пособия присутствуют четко выраженные подразделения: теоретические основы, описание установки, методические указания по выполнению работы и формированию отчета, рекомендуемая литература.

Исследование магнитных свойств вещества в условиях высокочастотного, либо импульсного перемагничивания имеет большое практическое значение в физике твердого тела. В пособии рассматривается динамика перемагничивания для наиболее важного случая – когда перемагничивание осуществляется за счет движения доменной границы. При этом механизм смещения представляется последовательным поворотом элементарных магнитных моментов в объеме образца, где происходит движение доменной границы.

Методическое пособие свидетельствует, что авторы стремились к четкому и ясному изложению материала, использованию рисунков и графиков. В пособии содержатся вопросы для самопроверки. Все это позволяет активизировать учебный процесс, способствует лучшему усвоению студентами данной темы курса физики магнитных материалов.

В целом следует отметить, что рецензируемое методическое пособие соответствует предъявляемым требованиям и его издание представляется своевременным и необходимым.

Доцент каф. теоретической физики,
к.ф.-м.н. Деминов Р.Г.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА №6 ЗАСЕДАНИЯ КАФЕДРЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ОТ 22.11.2014.

Присутствовали: проф. Тагиров Л.Р., проф.Садыков Э.К., проф. Петухов В.Ю., проф. Парфенов В.В., доц. Ивойлов Н.Г., доц. Болтакова Н.В., доц. Храмов А.С., доц. Вагизов Ф.Г., асс. Пятаев А.В., инж. Хуснутдинова Г.М.

Слушали: проф. Парфенова В.В. о подготовленных коллективом авторов (Парфенов В.В., Закиров Р.Х., Болтакова Н.В.) методических пособиях для практикума «Физика конденсированного состояния».

Постановили: Рекомендовать с опубликованию в электронном варианте методические пособия для практикума «Физика конденсированного состояния» согласно нижеприведенному списку:

1. Контактные явления в полупроводниках. Полупроводниковый диод;
2. Полупроводниковый инжекционный лазер;
3. Изучение работы солнечной батареи;
4. Изучение процессов намагничивания и перемагничивания магнетиков;
5. Изучение частотной зависимости магнитной восприимчивости;

Голосовали: единогласно.

Зав. кафедрой физики твердого тела Института физики КФУ Тагиров Л.Р.

Секретарь Хуснутдинова Г.М.