Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Ферромагнитный резонанс

Лабораторный практикум

Москва 2021

УДК ББК ??

Ферромагнитный резонанс: Лабораторный практикум / А.Н. Егоров, А.В. Кузнецов, О.Б. Маврицкий. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. ?? с.

Лабораторная работа посвящена изучению явления ферромагнитного резонанса и экспериментальных методов его наблюдения. Ее целью является определение фактора спектроскопического расщепления и константы энергии магнитной анизотропии из измерений ферромагнитного резонанса в монокристалле железо-иттриевого граната.

Издание предназначено для аспирантов, студентов магистратуры и старшего курса бакалавриата, обучающихся по направлению 01.04.07 Физика конденсированного состояния вещества специальности 03.06.01. Физика и астрономия.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, с.н.с. А.В. Семено.

ISBN

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021

Ферромагнитный резонанс

Цель работы: определение фактора спектроскопического расщепления и константы энергии магнитной анизотропии из измерений ферромагнитного резонанса в железо-иттриевом гранате.

1 Теория ферромагнитного резонанса

В магнитном поле B уровни энергии магнитных ионов расщепляются на величины, кратные $g\mu_{\text{B}}B$, где $\mu_{\text{B}} = \hbar e/2mc = 9.274 \cdot 10^{-21}$ эрг/Гс — магнетон Бора, e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, $\hbar$ — постоянная Планка. Данное явление называется *эффектом Зеемана.* Величина фактора спектроскопического расщепления g, или просто g фактора, зависит от строения и состояния внешней оболочки иона. У свободных атомов g фактор является константой, называемой фактором Ланде. В твердом теле на внешние оболочки ионов влияют электрические кристаллические поля, действующие со стороны окружающих ионов. Они изменяют состояние внешней оболочки и, как следствие, величину g фактора, который, как правило, становится анизотропным.

Магнитный момент оболочки складывается из орбитального и спинового моментов, имеющих разные величины g-фактора. У орбитального его значение равно единице, а у спинового — двойке.

Кристаллическое поле модифицирует волновые функции d оболочек металлов группы железа таким образом, что орбитальный вклад в магнитный момент практически отсутствует. Их момент имеет спиновую природу и потому измеряемые значения g факторов очень близки к двойке.

Исследовать величину и анизотропию g-фактора позволяют измерения резонансного поглощения электромагнитного излучения, возникающего на частотах ν_r, при которых энергия кванта излучения равна расстоянию между уровнями зеемановского расщепления, $h\nu_r = g\mu_\text{B}B$ ($h = 2\pi\hbar$). В этом состоит суть явлений электронного парамагнитного, ферромагнитного, антиферромагнитного и ядерного магнитного резонансов. В последнем случае магнитное поле расщепляет уровни энергий ядер, обладающих магнитным моментом.

Последовательный квантовомеханический анализ магнитных резонансов очень сложен, но для веществ, обладающих упорядоченной магнитной структурой, можно применить классический подход, заменив микроскопический квантовый анализ взаимодействия магнитных моментов с полем классическим анализом взаимодействия поля с намагниченностью, являющейся макроскопической величиной.

1.1 Линия поглощения

В магнитном поле на механический момент иона $\mathbf{J}$ действует момент сил $\mathbf{T} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$, под действием которого $\mathbf{J}$ изменяется со временем: $d\mathbf{J}/dt = \mathbf{T}$. Пропорциональное изменение магнитного момента $\boldsymbol{\mu}$ описывает уравнение $g\gamma d\mathbf{J}/dt = d\boldsymbol{\mu}/dt = g\gamma(\boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B})$, где $\gamma = -e/2mc$ — гиромагнитное отношение, а g — фактор Ланде или тензорный фактор спектроскопического расщепления.

В однородном поле для однородно намагниченного тела, просуммировав моменты, можно получить уравнение изменения намагниченности. Учитывая, что $\mathbf{B} = \mathbf{H}_m + 4\pi\mathbf{m}$ и $\mathbf{m} \times \mathbf{m} = 0$, оно

имеет вид

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = g\gamma(\mathbf{m} \times \mathbf{H}_m), \tag{1}$$

где $\mathbf{H}_m$ — напряженность поля внутри тела. Данное уравнение описывает прецессию вектора $\mathbf{m}$ с частотой $\omega_r = g|\gamma|H_m$ относительно направления вектора $\mathbf{H}_m$, а величина $\hbar\omega_r = g\mu_{\text{B}}H_m$ соответствует энергии зеемановского расщепления уровней в поле H_m.

Диссипация энергии ведет к затуханию прецессии вектора намагниченности и в конечном итоге к его ориентированию вдоль направления поля. Если ортогонально постоянному полю приложить переменное поле $\mathbf{h}_\omega$, изменяющееся с частой ω, то при равенстве частот, $\omega = \omega_r$, прецессия будет поддерживаться за счет поглощении энергии переменного поля. Это классическое описание явления ферромагнитного резонанса.

Изменение намагниченности с учетом диссипации описывает уравнение Ландау-Лифшица, имеющее в формулировке Гильберта вид [1–3]

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = g\gamma(\mathbf{m} \times \mathbf{H}_m) + \alpha\frac{\mathbf{m}}{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt}. \tag{2}$$

Здесь $\alpha > 0$ — параметр затухания. Воспользуемся данным уравнением, чтобы продолжить анализ.

Рассмотрим ферромагнетик, помещенный в однородное постоянное магнитное поле $\mathbf{H} = (0, 0, H)$, приложенное вдоль оси z, как показано на рис. 1.1. Величина поля достаточно велика, чтобы тело намагнитилось до однодоменного состояния. Перпендикулярно к $\mathbf{H}$ приложено переменное поле $\mathbf{h}_\omega = \mathbf{h}e^{i\omega t}$, $\mathbf{h} = (h_x, h_y, 0)$, изменяющееся с частой ω. Размеры образца малы по сравнению с длиной волны переменного поля, которое тоже можно считать однородным. Амплитуда переменного поля мала, $h \ll H$, и наведенная переменная намагниченность $\mathbf{m}_\omega = \tilde{\mathbf{m}}\mathrm{e}^{i\omega t} =$, $\tilde{\mathbf{m}} = (\tilde{m}_x, \tilde{m}_y, 0)$ связана с ним линейно. Направленная вдоль постоянного поля спонтанная намагниченность $\mathbf{m}_0 = (0, 0, m_0)$ велика по сравнению с

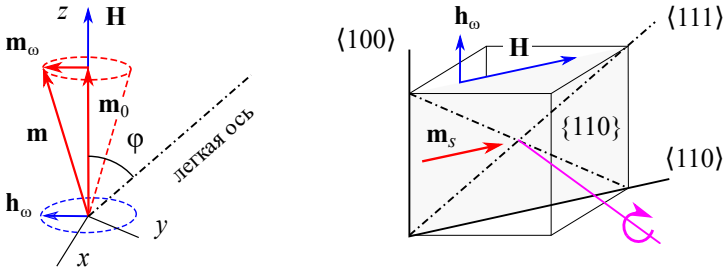

Рис. 1.1. Схема взаимной ориентации приложенных полей, намагниченности образца и легких осей. *Слева:* прецессия вектора намагниченности $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \mathbf{m}_\omega$ в постоянном поле $\mathbf{H}$ и переменном поле $\mathbf{h}_\omega$. *Справа:* взаимная ориентация направлений полей, спонтанной намагниченности и кристаллографических осей ⟨100⟩, ⟨110⟩, ⟨111⟩, лежащих в плоскости {110}, выделенной серым цветом. Оси легкого намагничивания ⟨111⟩ обозначены штрихпунктирными линиями. Пурпурным цветом помечена ось вращения образца в экспериментах

переменной, $\tilde{m} \ll m_0$, поэтому амплитуду полной намагниченности $\mathbf{m} = \mathbf{m}_0 + \tilde{\mathbf{m}}$ будем считать равной ей, $m = m_0$.

Для начала пренебрежем отличием поля внутри образца от приложенного. Тогда для намагниченности, находящейся в поле $\mathbf{H}_m = \mathbf{H} + \mathbf{h}e^{i\omega t}$, уравнение (2) запишется в виде

$$i\omega\mathbf{m}_\omega = g\gamma(\mathbf{m}_0 + \mathbf{m}_\omega) \times (\mathbf{H} + \mathbf{h}_\omega) + (i\alpha\omega/m)(\mathbf{m}_0 + \mathbf{m}_\omega) \times \mathbf{m}_\omega.$$

Учитывая, что $\mathbf{m}_0 \times \mathbf{H} = 0$, отбросив малые члены порядка $\mathbf{h}_\omega\mathbf{m}_\omega$ и $\mathbf{m}_\omega^2$ и сократив экспоненты, преобразуем его к векторному равенству

$$i\omega\tilde{\mathbf{m}} = g\gamma(\mathbf{m}_0 \times \mathbf{h} + \tilde{\mathbf{m}} \times \mathbf{H}) + (i\omega\alpha/m_0)(\mathbf{m}_0 \times \tilde{\mathbf{m}}).$$

Учитывая, что $\mathbf{H}/H = \mathbf{m}_0/m_0 = \mathbf{e}_z$, разделив правую и левую часть на $i\omega$ и введя обозначения $\mathbb{h} = g|\gamma|H/\omega$ и $\chi_r = g|\gamma|m_0/\omega$, получим

$$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{e}_z \times \left[(\alpha - i\mathbb{h})\tilde{\mathbf{m}} + i\chi_r\mathbf{h}\right]. \tag{3}$$

В скалярной форме векторное равенство сводится к системе двух уравнений

$$\begin{aligned}\tilde{m}_x &= -[(\alpha - i\mathbb{h})\tilde{m}_y + i\chi_r h_y],\\ \tilde{m}_y &= \quad (\alpha - i\mathbb{h})\tilde{m}_x + i\chi_r h_x.\end{aligned}$$

Ее решение находится простой подстановкой одного из равенств в другое

$$\tilde{m}_x = -\chi_r \frac{(\mathbb{h} + i\alpha)h_x + ih_y}{1 + (\alpha - i\mathbb{h})^2},$$
$$\tilde{m}_y = -\chi_r \frac{(\mathbb{h} + i\alpha)h_y - ih_x}{1 + (\alpha - i\mathbb{h})^2},$$

В векторной форме решение уравнения (3) можно записать в виде

$$\tilde{\mathbf{m}} = \chi_1 \mathbf{h} - i\chi_2(\mathbf{e}_z \times \mathbf{h}), \tag{4}$$

$$\chi_1 = -\frac{\chi_r(\mathbb{h} + i\alpha)}{1 + (\alpha - i\mathbb{h})^2} = \chi_1' - i\chi_1'', \quad \chi_2 = -\frac{\chi_r}{1 + (\alpha - i\mathbb{h})^2} = \chi_2' - i\chi_2'',$$
$$\chi_1' = -\frac{\chi_r(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)\mathbb{h}}{(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\mathbb{h}^2}, \quad \chi_2' = -\frac{\chi_r(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)}{(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\mathbb{h}^2},$$
$$\chi_1'' = \frac{\chi_r\alpha(1 + \mathbb{h}^2 + \alpha^2)}{(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\mathbb{h}^2}, \quad \chi_2'' = \frac{2\chi_r\alpha\mathbb{h}}{(1 - \mathbb{h}^2 + \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\mathbb{h}^2}.$$

Величины $\tilde{\mathbf{m}}$ и $\mathbf{h}$ малы и связаны между собой линейно, а χ_1 и χ_2 суть комплексные магнитные восприимчивости.

Из выражения (4) следует, что магнитная восприимчивость, связывающая наведенную намагниченность $\mathbf{m}$ с приложенным полем, является тензором, $\mathbf{m} = \overleftrightarrow{\chi}\mathbf{H}_m$. В матричной форме связь намагниченности и полей можно представить в виде[1]

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_1 & i\chi_2 & 0 \\ -i\chi_2 & \chi_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_0/H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ H \end{pmatrix}. \tag{5}$$

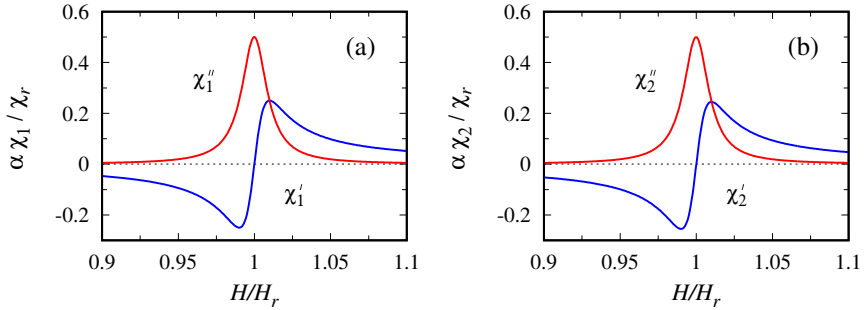

Рис. 1.2. Полевые зависимости компонент тензора магнитной восприимчивости χ_1 (a) и χ_2 (b) при $\alpha = 0.01$

Полевые зависимости компонент тензора магнитной восприимчивости представлены на рис. 1.2 в нормированных координатах. На графиках компоненты восприимчивости нормированы на величину χ_r и умножены на параметр затухания, так как $\chi \propto \alpha^{-1}$ при малых α. В выбранной нормировке амплитуды компонент восприимчивости практически не меняются при варьировании α, но ширина резонансных линий изменяется пропорционально изменению α. На рис. 1.2 кривые построены для $\alpha = 0.01$.

Сумма мнимых частей восприимчивостей χ_1 и χ_2 определяет форму линии поглощения излучения, показанную на рис. 1.3. Она описывается выражением

$$\chi'' = \chi_1'' + \chi_2'' \simeq \frac{\chi_r \alpha (1+\mathbb{h})^2}{(1-\mathbb{h}^2)^2 + 2\alpha^2(1+\mathbb{h}^2)}. \tag{6}$$

Мы немного упростили его, отбросив члены порядка α^3 и α^4.

Анализ показывает, что положение максимума, следующее из уравнения $\partial\chi''/\partial\mathbb{h} = 0$, соответствует значению $\mathbb{h} \simeq 1/\sqrt{1+\alpha^2}$ [3], а ширина линии на ее полувысоте равна удвоенному параметру затухания. Таким образом, поле резонанса H_r можно с хорошей

[1]Коэффициент m_0/H, строго говоря, восприимчивостью не является.

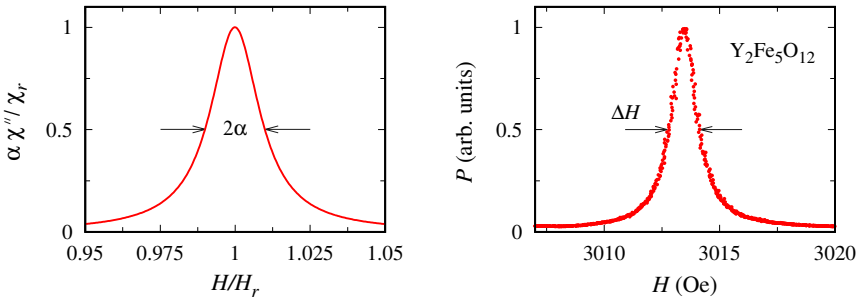

Рис. 1.3. Линия поглощения ферромагнитного резонанса при $\alpha = 0.01$

точностью определить по положению максимума линии поглощения, а параметр затухания из ее полуширины на полувысоте. В квантовомеханическом описании резонансу соответствует поглощение излучения при переходах между зеемановскими уровнями: $h\nu = \hbar\omega_r = g\mu_{\text{B}}H_r$.

1.2 Размагничивающий эффект

Магнитные моменты ионов создают размагничивающее поле $\mathbf{H}_d$, поэтому внутри ферромагнетика поле $\mathbf{H}_m = \mathbf{H} + \mathbf{h}_\omega + \mathbf{H}_d$ отличается от внешнего поля $\mathbf{H} + \mathbf{h}_\omega$. Размагничивающее поле складывается из полей, генерируемых отдельными магнитными диполями, и в точке наблюдения $\mathbf{r}$ имеет величину

$$\mathbf{H}_d(\mathbf{r}) = \sum_i \frac{3\mathbf{e}_i(\mathbf{e}_i\boldsymbol{\mu}_i) - \boldsymbol{\mu}_i}{|r - r_i|^3}, \qquad \mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_i}{|r - r_i|}.$$

Сумма берется по всем моментам $\boldsymbol{\mu}_i$, расположенным в точках $\mathbf{r}_i$.

Если намагниченность однородна, размагничивающее поле можно связать с ней через размагничивающий тензор $\mathbf{H}_d(\mathbf{r}) = -\overleftrightarrow{\mathcal{N}}\,\mathbf{m}$, определяющийся формой тела. Для образцов в форме эллипсоида тензор сводится к трем размагничивающим коэффи-

циентам [4, 5]

$$\mathcal{N}_a = \mathcal{N}(b/a, c/a), \qquad \mathcal{N}_b = \mathcal{N}(a/b, c/b), \qquad \mathcal{N}_c = \mathcal{N}(a/c, b/c),$$

$$\mathcal{N}(\xi, \eta) = 2\pi \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{(1+x)^3(1+x\xi^2)(1+x\eta^2)}}, \tag{7a}$$

$$\mathcal{N}_a + \mathcal{N}_b + \mathcal{N}_c = 4\pi. \tag{7b}$$

Здесь a, b и c — оси эллипсоида. Очевидно, что размагничивающие коэффициенты шара одинаковы. Из (7b) следует, что у шара $\mathcal{N}_a = \mathcal{N}_b = \mathcal{N}_c = 4\pi/3$, а коэффициенты эллипсоида вращения с осью вращения a имеют простую связь

$$\mathcal{N}_b = \mathcal{N}_c = 2\pi - \mathcal{N}_a/2.$$

Из (7a) следует, что чем длиннее ось, тем меньше размагничивающий коэффициент. Для сильно вытянутого эллипсоида вращения $\mathcal{N}_a \to 0$, $\mathcal{N}_b = \mathcal{N}_c \simeq 2\pi$, а у сильно сплюснутого $\mathcal{N}_b = \mathcal{N}_c \to 0$ и $\mathcal{N}_a \simeq 4\pi$.

Когда намагниченность направлена вдоль одной из осей эллипсоида, размагничивание описывается единственным коэффициентом $\mathcal{N}$, называемым размагничивающим фактором. Если направление намагниченности не совпадает с осями эллипсоида, ее можно разложить на компоненты вдоль осей $m_a = \mathbf{e}_a\mathbf{m}$, $m_b = \mathbf{e}_b\mathbf{m}$, $m_c = \mathbf{e}_c\mathbf{m}$ и выразить через них размагничивающее поле

$$\mathbf{H}_d = -(\mathcal{N}_a m_a \mathbf{e}_a + \mathcal{N}_b m_b \mathbf{e}_b + \mathcal{N}_c m_c \mathbf{e}_c).$$

Здесь $\mathbf{e}_a$, $\mathbf{e}_b$ и $\mathbf{e}_c$ — орты осей.

Когда постоянное поле приложено вдоль оси a, а переменное вдоль b (или c), поле внутри ферромагнитного эллипсоида равно

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{H} + \mathbf{h}_\omega - (\mathcal{N}_a \mathbf{m}_0 + \mathcal{N}_b \mathbf{m}_\omega).$$

Для этого поля можно составить и решить уравнение, подобное (3). Анализ показывает, что в этом случае резонансная частота зависит от коэффициентов размагничивания следующим образом [3, 4]

$$h\nu = g\mu_{\text{B}}\sqrt{[H_r + (\mathcal{N}_b - \mathcal{N}_a)m_0][H + (\mathcal{N}_c - \mathcal{N}_a)m_0]}.$$

Для эллипсоида вращения с полуосями $a \neq b = c$ эта зависимость упрощается:

$$h\nu = g\mu_{\text{B}}(H_r + \mathcal{N}m_0), \quad \mathcal{N} = (4\pi - 3\mathcal{N}_a)/2. \tag{8}$$

В случае эллипсоида вращения частота зависит только от одного коэффициента, который удобно представить в форме (8). Если a является длинной осью, то $\mathcal{N}_a < \mathcal{N}_b, \mathcal{N}_c$, и при фиксированной частоте ν резонанс смещается в сторону меньших полей, тогда как в поле, приложенном вдоль короткой оси ($\mathcal{N}_a > \mathcal{N}_b, \mathcal{N}_c$) он наблюдается в более сильных полях. У образца в форме шара размагничивающие коэффициенты одинаковы, поэтому размагничивание не влияет на условия резонанса.

Сдвиг резонансной частоты может быть довольно большим. Например, в образце железо-иттриевого граната, исследуемом в настоящей работе, величина m_0 составляет 1800 [эрг/Гс] [1, 6] (1 emu = 1 Э), и в поле $H \simeq 3.6$ кЭ, примерно соответствующем резонансу, у практически сферического образца с отношением осей $b/a = c/a = 0.985$, которому соответствует $\mathcal{N} = 0.077$ [7], частота сдвинется примерно на четыре процента, а при большем различии длин осей $b/a = c/a = 0.94$, соответствующем $\mathcal{N} = 0.31$ [2, 7], сдвиг увеличится до пятнадцати процентов.

Приведенные оценки показывают, что зависимость резонансной частоты от формы образца следует учитывать в анализе результатов экспериментов.

1.3 Магнитная анизотропия

Электронная плотность внешних электронных оболочек ионов, подстраиваясь под конфигурацию воздействующего на нее кристаллического электрического поля, привязывает направление векторов орбитальных моментов $\mathbf{J}$ к определенным направлениям кристаллической решетки, вдоль которых энергия оболочек минимизируется. В свою очередь, спин-орбитальное взаимодействие привязывает к ним и спины ионов, поэтому вектор намагниченности ферромагнетика $\mathbf{m}$ ориентируется вдоль выделенных кристаллографических направлений.

В макроскопическом описании для учета этих процессов вводится энергия магнитной анизотропии E_{A} и понятия *легких осей и плоскостей* кристалла.[2] Если намагниченность направлена вдоль легкой оси (или лежит в легкой плоскости), энергия E_{A} минимальна, а при отклонении направления $\mathbf{m}$ от легкой оси (или плоскости) она возрастает.

Магнитная анизотропия вызывает зависимость частоты ферромагнитного резонанса от направления в кристалле. Чтобы определить ее, к приложенным полям добавляется эффективное магнитное поле анизотропии $\mathbf{H}_{\mathrm{A}} = -dE_{\mathrm{A}}/d\mathbf{m} = -\overleftrightarrow{\mathbb{N}}_{\mathrm{A}}\mathbf{m}$. Так как энергия E_{A} зависит от направления намагниченности, эффективное поле удобно выразить через тензор анизотропии $\overleftrightarrow{\mathbb{N}}$, коэффициенты которого зависят от угла φ между направлением намагниченности и легкой осью, показанного на рис. 1.1.

С учетом магнитной анизотропии, поле воздействующее на намагниченность, записывается как

[2]Тип магнитной анизотропии характеризует ось, вдоль которой достигается либо максимум, либо минимум энергии E_{A}. Если энергия максимальна, анизотропия имеет тип «легкой плоскости», ортогональной оси трудного намагничивания, или просто «трудной оси». Если же оси симметрии соответствует минимум энергии, то ее называют осью легкого намагничивания или анизотропией типа «легкая ось».

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{H} - (\mathcal{N}_a + \mathbb{N}_a)\mathbf{m}_0 + \mathbf{h}_\omega - (\mathcal{N}_b + \mathbb{N}_b)\mathbf{m}_\omega,$$

а условие резонанса для образца в форме эллипсоида вращения принимает вид

$$h\nu = g\mu_{\text{в}}\{H_r + [\mathcal{N} + \mathbb{N}(\varphi)]m_0\}. \tag{9}$$

В образце, состоящем из двух или нескольких монокристаллических блоков, слегка разориентированных друг относительно друга, резонансам могут соответствовать немного разные поля, что приведет к уширению линии поглощения. Если при повороте образца легкие оси блоков вращаются немного по-разному, ширина линии будет изменяться в зависимости от угла поворота. Такой эффект отчетливо наблюдается в измерениях, выполняемых в лабораторной работе.

2 Методика экспериментов

2.1 Экспериментальная установка

Показанная на рис. 2.1 установка для изучения ферромагнитного резонанса состоит из трех узлов, отличающихся своим функциональным назначением. В ее состав входят электромагнит, волноводный тракт и привод вращения образца.

- Электромагнит обеспечивает однородное магнитное поле $\mathbf{H}$, величина которого регулируется прецизионным источником питания.
- Образец помещен в волноводный тракт сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения гигагерцового диапазона, зажатый между сердечниками электромагнита. Магнитное поле электромагнитной волны, возбуждаемой в волноводе, является переменным полем $\mathbf{h}_\omega$.

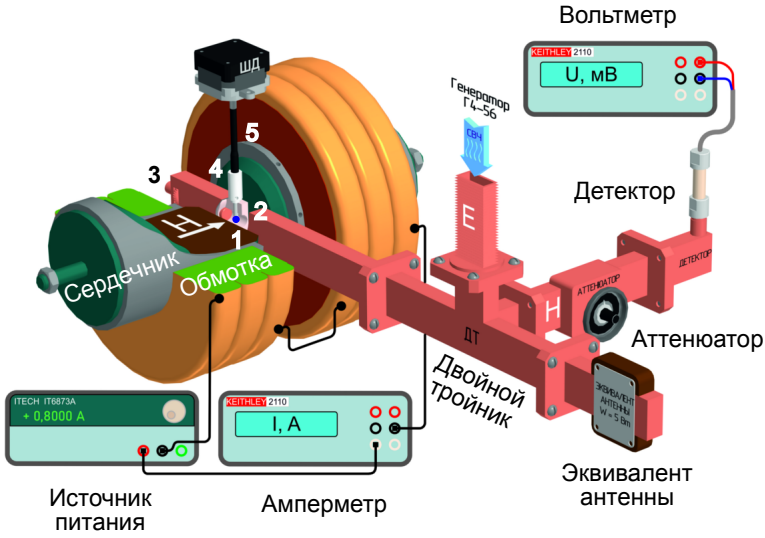

Рис. 2.1. Основные элементы экспериментальной установки

- Привод на основе шагового двигателя обеспечивает вращения образца вокруг оси, перпендикулярной вектору **H** и продольной оси волноводного тракта.

Рассмотрим устройство каждого узла более подробно.

Электромагнит

Для наглядности левая часть электромагнита приведена на рис. 2.1 в разрезе, там же показана схема его подключения к источнику питания IT6873A.

Между цилиндрическими сердечниками электромагнита имеется зазор шириной 12 мм, соответствующий внешнему размеру волноводного тракта. Большой диаметр сердечников, составляющий 80 мм, обеспечивает хорошую однородность магнитного поля в объеме образца, имеющем диаметр $d = 0.54$ мм. Обмотки

магнита выполнены в виде нескольких секций, последовательно-параллельное соединение которых позволяет согласовать их сопротивление с нагрузочной способностью источника питания.

Источник питания IT6873A работает в режиме стабилизации тока и обеспечивает возможность его изменения с минимальным шагом 0.1 мА. Источником питания управляет программа, описанная в разд.2.2.

Значение тока регистрирует измерительная программа, считывающая показания мультиметра Keithley 2110, включенного в разрыв цепи питания и обозначенному на рис. 2.1 как Амперметр.

Коэффициент пересчета тока питания электромагнита в величину создаваемого поля составляет 4.35 Э/мА.

Внимание **!**	Для измерения тока используйте гнезда LO и I 3A мультиметра Keithley 2110.	

Измерительный волноводный тракт

Образец 1 помещается в поле стоячей электромагнитной волны, возбуждаемой в волноводном тракте, представленном на рис. 2.1. Элементы тракта построены с использованием стандартного волноводного канала типоразмера «10×23 мм», предназначенного для диапазона частот от 8600 до 9600 МГц. Точное значение сечения волновода составляет 10.2×22.9 мм.

Для измерения поглощения излучения образцом используется компенсационная (или «мостовая») схема, основой которой служит двойной волноводный тройник (или «мост»). Двойной тройник (ДТ) представляет собой основной волновод с двумя

ответвителями-плечами, примыкающими к его узкой (E-плечо) и широкой (H-плечо) стенкам. Оси ответвителей и основного волновода взаимно ортогональны.

СВЧ излучение с частой 9303 МГц, поступающее от генератора Г4-56, заводится в мост по гофрированному волноводу через E-плечо. Если нагрузки на концах двойного тройника имеют одинаковое сопротивление и расположены симметрично относительно осей E и H плеч, то в H-плече отраженные волны оказываются в противофазе и гасят друг друга.

В качестве нагрузки на коротком конце ДТ установлен волноводный эквивалент антенны, поглощающий часть СВЧ-мощности и компенсирующий потери, имеющиеся в противоположной части моста. При резонансном поглощении излучения образцом потери возрастают и детектор, установленный в конце H плеча, регистрирует сигнал разбаланса моста, пропорциональный поглощаемой мощности.

Сигнал детектора, представляющего собой СВЧ-диод, регистрирует цифровой мультиметр Keithley 2110, обозначенный на рис. 2.1 как Вольтметр. Установленный перед детектором аттенюатор поглощает часть мощности, чтобы предотвратить его насыщение. В силу малости регистрируемого сигнала он отрегулирован на полное пропускание.

В длинном конце ДТ, зажатом между сердечниками электромагнита, имеется узел, служащий для компенсации моста. В волновод вмонтирована диэлектрическая фторопластовая вставка 2, в которую вкручен латунный винт 3, диаметром 8 мм, перекрывающий часть сечения волновода. Отражая часть СВЧ мощности, он формирует в ДТ стоячую волну. Вкручивая и выкручивая его, можно компенсировать мост. Для этого один из концов винта выведен из волновода.

При наладке установки расстояние между торцом винта и образцом подбиралось так, чтобы обеспечить максимальный сигнал детектора при резонансном поглощении и минимальный уро-

вень сигнала компенсированного моста. Полученное расстояние ~ 17 мм примерно соответствует половине длины волны используемого излучения, поэтому образец располагается в области пучности стоячей волны.

Привод вращения образца

Образец располагается в центре сечения волновода. Его вращение относительно направления постоянного поля **H** обеспечивает привод, изготовленный на основе шагового двигателя, помеченного на рис. 2.1 аббревиатурой ШД. При вращении важно предотвратить перемещение образца как вдоль оси вращения, так и перпендикулярно ей. Для этого во фторопластовой вставке 2 просверлено отверстие, в которое вставлен хвост фторопластового цилиндрического держателя 4 с образцом 1. Поперечное смещение образца ограничено разностью диаметров хвоста и отверстия, не превышающей 50 мкм. Положение образца на оси вращения фиксирует уступ держателя, упирающийся в стенку волновода. Вращение вала шагового двигателя передается на держатель с помощью пластиковой трубки, поджимающей его к волноводу.

Управляет вращением программа, описанная в следующем разделе.

2.2 Автоматизация измерений

Измерения автоматизированы с помощью управляющей и измерительной программ, окна которых показаны на рис. 2.2. Заголовок окна управляющей программы окрашен синим цветом.

Управляющая программа

Управляющая программа позволяет поворачивать образец и регулировать ток электромагнита. Ее кнопка `Поворот` инициирует

вращение образца, которое можно остановить, нажав кнопку Стоп, становящуюся активной при вращении.

Значение угла вводится в расположенное слева текстовое поле, при этом, если переключатель абс. – отн. находится состоянии «отн.», задается его приращение относительно текущего значения.

Кнопка Калибр. служит для калибровки текущего положения образца.

Группа элементов Сканирование по току служит для управления током питания электромагнита. Кнопка Старт запускает развертку тока, которую можно прервать, нажав кнопку Стоп, становящуюся активной во время развертки.

Измерительная программа

Измерительная программа регистрирует ток электромагнита и сигнал детектора, выводит их в виде графика и сохраняет данные.

В левом верхнем углу окна измерительной программы находятся кнопки Start и Stop. Одна из них запускает, а другая завершает измерения. Клавиши клавиатуры Enter и Escape дублируют их действие.

Кнопка Stop становится активной после запуска, при этом кнопка Start замещается кнопкой Pause, как показано на рис. 2.2.

Справа вверху располагаются кнопки Save As, Settings и Exit. Их назначение описывается по мере необходимости далее.

В правом верхнем углу находится табло, показывающее текущие значения регистрируемых величин. Ниже его расположено табло счетчика измеренных точек.

Основную часть окна измерительной программы занимает графическая панель, на которую выводятся кривые поглощения. По оси абсцисс откладываются значения тока питания электромагнита, а по оси ординат — напряжение детектора СВЧ излучения. Две кривые для примера показаны на рисунке.

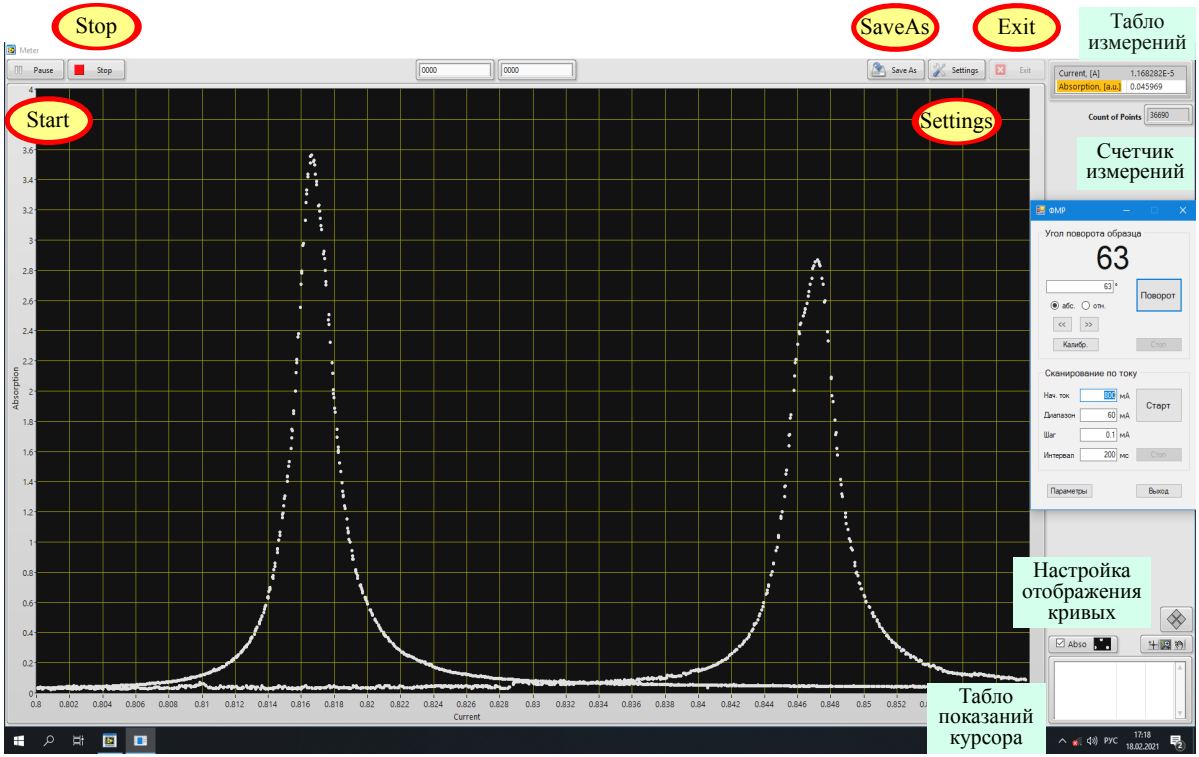

Рис. 2.2. Окна управляющей и измерительной программ

2.3 Образец

В лабораторной работе исследуется монокристаллический образец железо-иттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$. Данное соединение имеет кубическую кристаллическую структуру пространственной группы $Ia3d$ с периодом решетки $a = 12.38$ Å. Ячейка структуры показана на рис. 2.3.

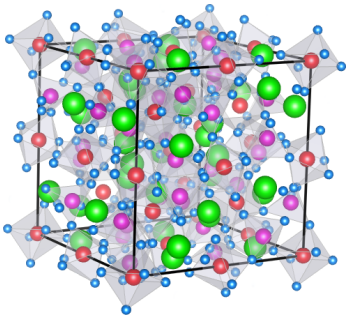

Рис. 2.3. Ячейка кристаллической структуры железо-иттриевого граната. Обозначения ионов: красные и сиреневые — Fe^{3+}, зеленые — Y^{3+}, синие — O^{2-}. Многогранниками показано октаэдрическое и тетраэдрическое кислородное окружение ионов железа

Ионы Fe^{3+}, имеющие октаэдрическое и тераэдрическое кислородное окружение, образуют две ферромагнитные подрешетки,[3] направленные друг против друга, поэтому соединение $Y_3Fe_5O_{12}$ является ферримагнетиком.

Легкими осями обеих подрешеток являются четыре большие диагонали кубической ячейки, соответствующие направлениям $\langle 111 \rangle$ кристалла. Температура ферримагнитного перехода в $Y_3Fe_5O_{12}$ равна 560 K, магнитный момент составляет $5\mu_B$ на формульную единицу, а спонтанная намагниченность при комнатной температуре имеет величину $m_0 = 1800$ [эрг/Гс] [1, 6].

Наличие двух магнитных подрешеток усложняет теоретический анализ ферримагнитного резонанса по сравнению с ферромагнитным [2, 3], но в $Y_3Fe_5O_{12}$ они состоят из одинаковых ионов,

[3] Подрешетки с октаэдрическим и тетраэдрическим окружением содержат соответственно 3/5 и 2/5 ионов железа, поэтому формулу соединения можно уточнить как $Y_3[Fe_3]\{Fe_2\}O_{12}$ [1].

имеющих одинаковый фактор спектроскопического расщепления, поэтому для описания резонанса можно пользоваться выражениями, полученными в разд. 1.

2.4 Процедура измерений

Измерения лабораторной работы проводятся следующим образом.

Магнитное поле **H** прикладывается к образцу шарообразной формы, имеющему эффективный размагничивающий коэффициент $\mathcal{N} = -0.156$. Ортогонально **H** приложено переменное поле $\mathbf{h}_\omega$ электромагнитной волны с фиксированной частотой $\nu = 9303$ МГц. Поле **H** медленно изменяется в узком диапазоне значений, для которых в образце наблюдается резонансное поглощение излучения. При развертке поля регистрируется кривая поглощения.

Образец ориентирован таким образом, что поле **H** лежит в плоскости {110}, как показано на рис. 1.1 (справа). Его величина достаточно велика, чтобы зафиксировать направление спонтанной намагниченности вдоль своего направления. В этом случае вращение образца вокруг оси, ортогональной плоскости {110}, дает следующую зависимость коэффициента анизотропии от угла поворота [2]:

$$\mathbb{N}m_0 = \frac{K_1}{m_0} f_1(\varphi) + \frac{K_2}{m_0} f_2(\varphi), \tag{10}$$

$$f_1(\varphi) = -\frac{3}{16} + \frac{5}{4}\cos 2\varphi + \frac{15}{16}\cos 4\varphi, \tag{11}$$

$$f_2(\varphi) = -\frac{7}{64} + \frac{5}{128}\cos 2\varphi + \frac{15}{64}\cos 4\varphi - \frac{21}{128}\cos 6\varphi,$$

а условие резонанса принимает вид

$$h\nu = g\mu_\text{в}\left[H_r + \mathcal{N}m_0 + \frac{K_1}{m_0} f_1(\varphi) + \frac{K_2}{m_0} f_2(\varphi)\right]. \tag{12}$$

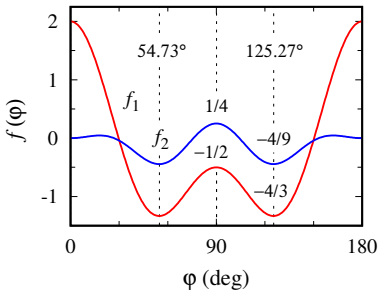

Рис. 2.4. Угловые зависимости функций магнитной анизотропии

Константы K_1 и K_2, определяющие характерный масштаб энергии E_A, имеющие размерность эрг/см^3, от приложенного поля не зависят. Функции $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$ показаны на рис. 2.4. Видно, что f_2 изменяется существенно слабее, чем f_1, к тому же константа K_2 в соединении $Y_3Fe_5O_{12}$ примерно в двадцать раз меньше, чем K_1 [6], поэтому угловая зависимость энергии анизотропии данного соединения в основном описывается первым членом (10).

Чтобы получить угловую зависимость резонансного поля, образец поворачивают относительно направления полей $\mathbf{H}$ и $\mathbf{h}_\omega$, и для ряда фиксированных углов снимают кривые поглощения.

3 Порядок выполнения работы

3.1 Подготовка к измерениям

- Включите питание СВЧ генератора, измерительных приборов и ПК.
- После включения источника питания IT6873A нажмите кнопку «Measure» на его панели.

По умолчанию на табло ИП выводятся значения, посылаемые внутреннему генератору тока, которые могут отличаться от генерируемого тока, если выходное напряжение или ток превысят

максимально допустимые величины. Кнопка «Measure» включает индикацию генерируемого тока, измеряемого встроенным амперметром.

- Запустите измерительную программу Meter, иконка которой находится на рабочем столе. Чтобы полностью развернуть окно после запуска программы, нажмите на белую прямоугольную иконку, как показано на рисунке 3.1.

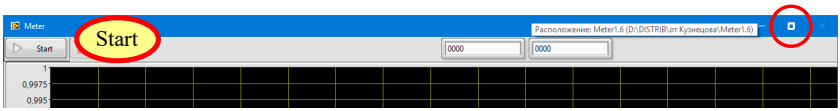

Рис. 3.1. Верхняя часть окна измерительной программы

- На графической панели измерительной программы нажмите правой клавишей мыши на подпись оси абсцисс Current и уберите флажок «Autoscale». Нажав на подпись Absorption, аналогичным образом уберите режим «Autoscale» оси ординат.

По умолчанию графическая панель использует режим Autoscale, в котором диапазон отображаемых значений автоматически увеличивается с ростом измеряемых величин, но в измерениях лабораторной работы он неудобен. Если данный режим отключить *после* начала измерений, диапазоны осей, скорее всего, не будут оптимальными. В этом случае, убедившись, что режим Autoscale отключен на обеих осях, нажмите кнопку Settings, и в появившемся окне нажмите OK. В силу вступят настройки с диапазоном 0.805–0.855 А на оси абсцисс и 0–4 мВ на оси ординат. Данную операцию можно выполнить, не прерывая измерение.

- Нажмите кнопку Start измерительной программы. Табло измерений начнет показывать значения тока в обмотке маг-

нита и напряжения детектора. Счетчик измерений станет увеличиваться.

- Проверьте правильность подключения измерительных приборов.

Мультиметры Keithley 2110 и табло измерений имеют маркировку, соответствующую измеряемой величине.

Мультиметр, помеченный буквой «I», и строчка табло с названием Current должны показывать ток в амперах, близкий к нулю на этом этапе.

Мультиметр, помеченный буквой «V» на пределе 100 mV должен показывать отрицательное напряжение меньше или порядка десятой милливольта, а строчка табло с названием Absorption — такое же положительное значение.

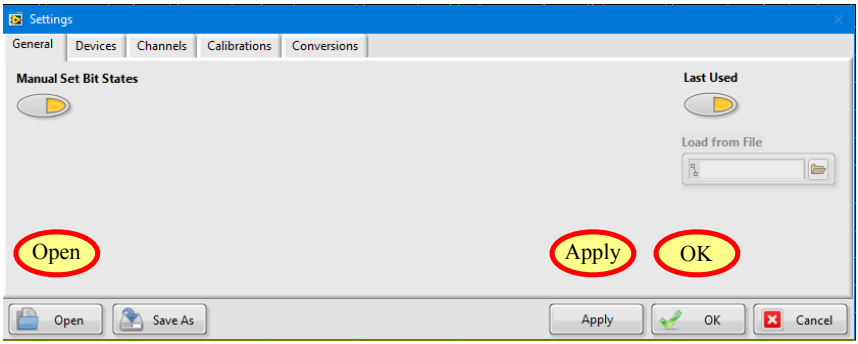

Рис. 3.2. Окно настройки измерений

Внимание !	Не меняйте самостоятельно настройки измерений! Данные, полученные при неправильных настройках, могут оказаться непригодны для дальнейшего анализа.

Если показания приборов и табло не соответствуют указанным, нажмите кнопку Settings и в открывшемся окне настроек, показанном на рис. 3.2, нажав кнопку Open, загрузите один из конфигурационных файлов с именами FMR.cfg, FMR-2.cfg, FMR-3.cfg... После чего нажмите кнопку Apply и, убедившись в правильности показаний приборов, закройте меню настроек, нажав кнопу OK.

Более подробно настройки измерительной программы и приборов описаны в прил. 2.

- Запустите управляющую программу FMR, иконка которой находится на рабочем столе.
- Нажмите кнопку Калибр., дождавшись окончания калибровки привода вращения, установите начальное значение угла ноль градусов и нажмите кнопку Поворот. После остановки вращения табло управляющей программы должно показать ноль.
- Проверьте установки значений развертки тока, оптимизированные под параметры электромагнита и быстродействие системы измерения сигналов:

Начальная величина тока	807 мА.
Диапазон развертки тока	50 мА.
Приращение тока за один шаг	0.1 мА.
Длительность одного шага	200 мс.

  и при необходимости скорректируйте их. Нажмите кнопку Старт. Табло источника питания должно показывать изменяющееся значение тока, а в левом нижнем углу измерительной программы начнет строиться кривая поглощения.
- После окончания развертки и сброса тока нажмите кнопку Стоп измерительной программы. В открывшемся меню отредактируйте паспорт измерения, занеся в него дату измерений, фамилии и номер группы коллектива, выполняющего лабораторную работу. В конце **отдельной строкой** занесите

значение угла, при котором проводилось измерение. Запишите измеренную кривую поглощения в файл, для этого в папке `d:\Laboratory\FMR` создайте папку с датой измерений, в которую будут помещаться файлы, например 12-02-2021, а в качестве имени файла используйте значение угла, например 000#0. При записи файл автоматически получит расширение dat.

Если все описанные действия выполнены успешно, приступайте к измерениям. Если после запуска развертки тока управляющей программой источник питания начинает издавать звуковые сигналы, выключите его и закройте программу. После этого вновь включите прибор, снова запустите программу и повторите указанные выше действия.

Внимание !	Порядок включения прибора IT6873A и запуска управляющей программы должен строго соблюдаться, так как при запуске программа настраивает прибор для управления от ПК, не проверяя его состояние.

Более подробно работа управляющей программы и ее настройки описаны в прил. 1.

3.2 Проведение измерений

При выполнении лабораторной работы необходимо снять кривые поглощения в диапазоне углов не менее 0–180° с шагом 4.5°. Регистрация кривых занимает много времени, поэтому следует придерживаться следующего оптимального алгоритма измерений.

- Находясь в окне измерительной программы, нажмите кнопку `Start` или клавишу `Enter` клавиатуры.

- Перейдите в управляющую программу. Задайте приращение угла поворота образца, равное 4.5°, и нажмите кнопку `Поворот`.
- Нажмите кнопку `Старт` развертки тока питания магнита и, убедившись, что ток изменяется, перейдите в окно измерительной программы.
- Нажмите дважды копку `Save As`, в открывшемся меню отредактируйте значение угла в паспорте измерения, задайте новое имя файла и нажмите кнопку `OK`. Это действие подготовит информацию для сохранения данных.
- Дождитесь окончания развертки тока, нажмите кнопку `Stop` или клавишу `Escape` клавиатуры. Это действие инициирует запись данных в файл.
- Нажмите кнопку `Start` или клавишу `Enter` клавиатуры, чтобы начать следующий цикл измерений.

Образец следует вращать, выставив приращение угла, равное 4.5°, тогда операция вращения сведется к нажатию кнопки `Поворот`. В качестве имени файла удобно выбрать значение угла, заменив нулями отсутствующие цифры сотен и десятков у малых углов и используя символ # для отделения дробной части, например 004#5 для угла 4.5° или 090#0 для угла 90°. Тогда в папке данных файлы будут упорядочены в порядке возрастания угла, что в дальнейшем упростит обработку данных.

Формирование паспорта измерения и имени файла непосредственно в процессе измерения существенно сокращает время, затрачиваемое на регистрацию кривой.

При переключении между окнами измерительной и управляющей программ следует учитывать, что строка состояния активной программы окрашивается синим цветом, а неактивной — белым, как это показано на рис. 2.2. Кнопки управляющей программы становятся активными, как только она получает фокус, т.е. курсор

переходит в ее окно. Кнопки измерительной программы становятся активными только после того, как в ее окне нажать левую клавишу мыши. Таким образом, чтобы запустить процесс управляющей программы, переключаясь между окнами, достаточно навести курсор на кнопку и нажать ее, а чтобы сделать это в измерительной программе, на кнопку фактически нужно нажать два раза, так как первое нажатие только активирует ее окно. Описанный выше оптимальный алгоритм учитывает это обстоятельство.

Диапазон развертки тока подобран так, чтобы обеспечить регистрацию всех кривых поглощения. На рис. 2.2 для примера показаны кривые, примерно соответствующие двум предельным положениям максимумов поглощения. Остальные кривые располагаются между ними. Левая кривая содержит справа длинный хвост, не несущий информации, поэтому, в целях экономии времени, на расстоянии $\sim$ 10 мА от максимума развертку можно остановить, нажав кнопку `Стоп` управляющей программы. Аналогичный хвост слева имеется и у правой кривой. Его можно сократить, скорректировав нижний предел развертки, однако таких смещенных вправо кривых не очень много, поэтому большого выигрыша времени такая операция не даст.

При сравнении кривых видно, что правая уширена сильнее левой. На ней отчетливо наблюдается тенденция к расщеплению пика поглощения. Кривые, снятые при углах различающихся на 63°, иллюстрируют обсуждавшийся в конце разд. 1.3 эффект уширения линии, связанный с магнитной анизотропией и наличием в образце нескольких монокристаллических блоков.

3.3 Окончание работы

- Выключите питание СВЧ генератора.
- Нажав кнопку `Выход`, закройте окно управляющей программы.

- Выключите измерительную программу. Для завершения ее работы нажмите кнопку `Exit` и закройте окно, как показано на рис. 3.3.

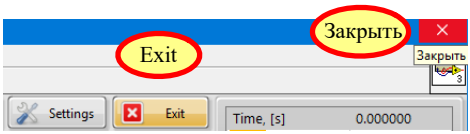

Рис. 3.3. Завершение работы измерительной программы

- Выключите источник питания IT6873A и мультиметры Keithley 2110.
- Скопируйте себе данные измерений, находящиеся в созданной вами папке `d:\Laboratory\FMR\###`.

4 Обработка результатов измерений

1. Используя коэффициент пересчета тока питания магнита в величину поля 4.35 Э/мА, постройте кривые поглощения. Для каждого угла по положению максимума определите резонансное поле.
2. Постройте зависимость резонансного поля от угла и подгоните ее зависимостью $H = a + bf_1(\varphi + \Delta)$, где Δ — сдвиг фазы, определяемый ориентацией легких осей в начальном положении образца. Пример кривой приведен на рис. 4.1.
3. Из полученного значения $b = K_1/m_0$ для $m_0 = 1800$ эрг/Гс определите константу анизотропии.
4. Взяв эффективный коэффициент размагничивания $\mathcal{N} = -0.156$, добавьте размагничивающее поле к полученному значению a и определите внутреннее резонансное поле $H_m = a + \mathcal{N} m_0$.

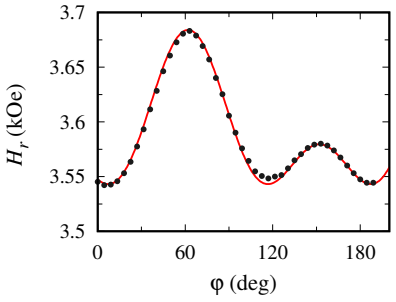

Рис. 4.1. Угловая зависимость резонансного поля

5. Определите величину g фактора: $g = h\nu/\mu_B H_m$.
6. Взяв самую узкую резонансную линию, измеренную при малых углах, оцените значение коэффициента затухания α.

В оценке коэффициента затухания нужно учесть аппаратное уширение линии поглощения, вызванное связью образца с волноводом, в котором он находится. Формула

$$\Delta H_m = \alpha H_r \left(1 + \frac{2\pi V}{\lambda S}\,\frac{4\pi\chi_r}{\alpha}\right)$$

связывает экспериментально измеряемую полуширину линии на полувысоте ΔH_m с ее собственной полушириной, равной $\Delta H = \alpha H_r$ (см. рис. 1.3 и конец разд. 1.1). Здесь V — объем образца, λ — длина волны переменного поля, S — площадь сечения волновода. Учитывая, что $\chi_r = m_0/H_r$, взяв образец в форме шара диаметром d, для коэффициента затухания получим выражение

$$\alpha = \frac{1}{H_r}\left(\Delta H_m - \frac{(2\pi d)^3 m_0}{6\lambda S}\right).$$

Как говорилось ранее, исследуемый в лабораторной работе образец имеет диаметр $d = 0.54$ мм, а сечение волновода составляет $S = 22.9 \times 10.2$ мм^2.

5 Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Зеемана?
2. Что такое ферромагнитный резонанс?
3. Для чего в измерениях ферромагнитного резонанса используется развертка магнитного поля?
4. Как на резонансную частоту влияет форма образца?
5. Как влияет размагничивание на резонансную частоту образца сферической формы?
6. Что такое поле кристаллографической анизотропии?
7. Почему резонансная частота зависит от ориентации образца относительно направления магнитного поля?
8. Для чего снимаются зависимости кривых поглощения от углов поворота образца?
9. Почему ширина линии поглощения зависит от ориентации образца относительно направления магнитного поля?
10. Каково назначение двойного волноводного тройника?

Приложение А

Приложения

1 Управляющая программа

Напряженность магнитного поля и ориентацию образца относительно его направления задает управляющая программа (УП), запускаемая ярлыком `FMR` на рабочем столе ОС Windows. Она позволяет изменять угол поворота образца относительно направления вектора магнитного поля и электрический ток, текущий через катушку электромагнита. Образец закреплен на оси привода вращения, управляемого микроконтроллером. Обмотки электромагнита подключены к программируемому источнику питания IT6872A (ИП). Микроконтроллер и источник питания подключены к компьютеру (ПК) через USB-интерфейс.

Главное окно управляющей программы показано слева на левой панели рис. 1.1. Расположенная справа кнопка `Поворот` инициирует вращение образца, во время которого символы `⋘` или `⋙`, замещающие значение угла, показывают направление вращения. Нажав кнопку `Стоп`, которая становится активной при работе шагового двигателя, вращение можно остановить. Следует иметь ввиду, что, вращаясь в сторону отрицательного угла (против

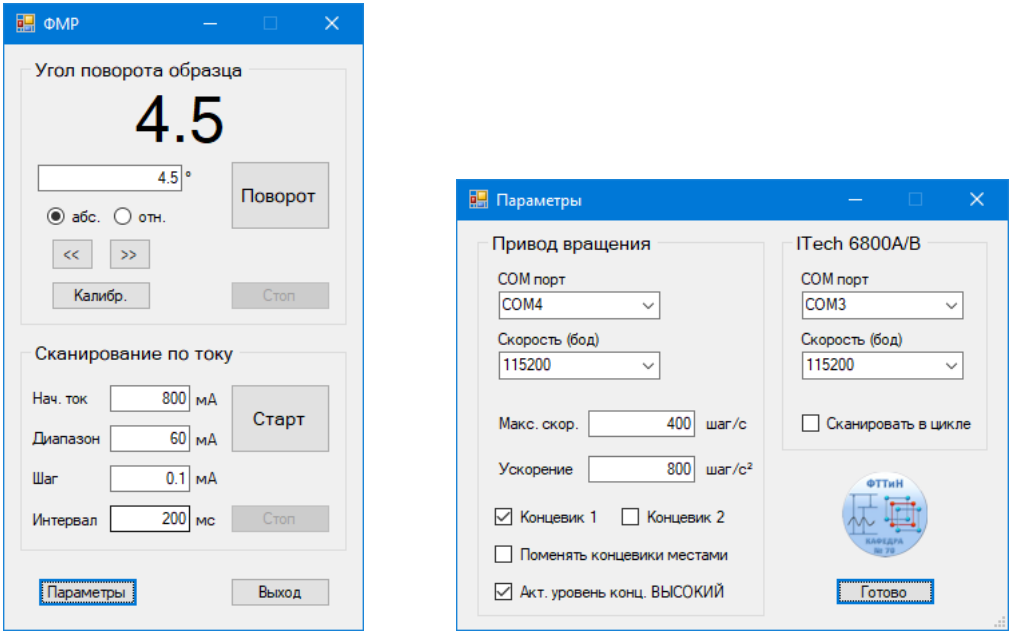

Рис. 1.1. Главное окно (слева) и окно настроек (справа) управляющей программы

часовой стрелки), двигатель остановится, дойдя до концевого выключателя, при этом значение угла обнулится. Таким образом, фактически угол положения образца не может стать отрицательным. Вращение по часовой стрелке (положительные углы) осуществляется на любой угол вплоть до нескольких полных оборотов.

Кнопки ≫, ≪ и клавиши → и ← клавиатуры ПК служат для вращения вручную. При кратковременном нажатии они поворачивают образец на один или несколько шагов, а при удержании вращение длится вплоть до отпускания. При ручном управлении поворот в обратную сторону (≪) также ограничен концевым выключателем шагового двигателя.

Кнопка Калибр. служит для калибровки текущего положения образца. Она необходима, если есть подозрение, что оно не соответствует углу, отображаемому в программе, например, из-за выключения питания ПК или перезапуска управляющей программы. Нажатие этой кнопки инициирует ряд действий. Сначала вал шагового двигателя поворачивается в сторону нулевого угла вплоть до концевого выключателя. При этом фиксируется фактический угол поворота, на который вал снова поворачивается, но уже в противоположном направлении. После калибровки значение угла измениться не должно,[1] если же это случилось, правильным является значение, установленное в ходе калибровки. Чтобы быть уверенным в корректности измерений, такую калибровку рекомендуется выполнять несколько раз: в начале, в процессе и в конце эксперимента.

Группа элементов Сканирование по току служит для управления током питания электромагнита. Назначение полей настройки достаточно информативно представлено в окне самой программы, поэтому опишем их лишь кратко, отметив, что величины токов задаются в миллиамперах:

[1]Из-за особенностей работы шагового двигателя возможно незначительное изменение на одну-две десятые доли градуса, которое не означает сбой привода вращения.

- поле `Нач. ток` задает начальную величину тока (**800 мА**);
- поле `Диапазон` задает диапазон развертки тока (**60 мА**) относительно начальной величины, при этом положительные и отрицательные значения соответствуют увеличению и уменьшению тока;
- поле `Шаг` задает приращение тока за один шаг (**0.1 мА**);
- поле `Интервал` задает длительность одного шага в миллисекундах (**200 мс**).

Указанные в скобках значения оптимизированы под параметры используемого электромагнита и быстродействие системы измерения сигналов. Менять их не рекомендуется.

Кнопка `Старт` запускает развертку тока, в начале которой в электромагнит вводится начальный ток, а после ее окончания ток выключается для уменьшения нагрева электромагнита, влияющего на результаты измерений. В любой момент развертку можно прервать, нажав кнопку `Стоп`. Изменение тока можно наблюдать на табло измерительной программы и мультиметра Keithley 2110, служащего амперметром (см. рис. 2.1).

Внизу главного окна управляющей программы расположены кнопки `Параметры` и `Выход`. Кнопка `Выход` и красная кнопка в правом верхнем углу окна завершают работу программы. При выходе все установленные параметры, включая текущее положение образца, сохраняются на диске ПК и восстанавливаются при последующем запуске.

Кнопка `Параметры` открывает окно настроек программы, показанное на правой панели рис. 1.1.

Контроллер шагового двигателя и источника питания IT6873A подключены к ПК через USB-интерфейс, представленный в ОС как последовательный (COM) порт. Параметры COM-портов, а также аппаратные параметры контроллера ШД представлены на рис. 1.1. Они настраивают управляющую программу для работы

с оборудованием лабораторного стенда, и менять их без особой необходимости не следует. Отметим лишь два параметра, важные для понимания алгоритма ее работы.

Флажок Концевик 1 включает и выключает действие концевого выключателя шагового двигателя. Его отключение позволяет поворачивать образец на отрицательные углы, однако при этом теряется возможность калибровать его положение.

Установка флажка Сканировать в цикле включает режим непрерывного сканирования тока, в котором при достижении конечного значения развертка запускается снова, а остановить циклический процесс позволяет кнопка Стоп. Данный режим предназначен для отладки оборудования лабораторного стенда с помощью осциллографа.

Окно Параметры закрывает кнопка Готово или красная кнопка в его правом верхнем углу. При этом произведенные настройки вводятся в действие без проверки, за исключением адресации COM-портов. За правильный выбор настроек отвечает пользователь управляющей программы.

При неправильной адресации COM-портов выдается сообщение об ошибке и появляется меню, предлагающее повторить настройку. Если не удается установить корректную адресацию (необходимые порты отсутствуют в системе), с помощью клавиши ESC на клавиатуре ПК окно можно закрыть, не сохраняя настроек.

2 Измерительная программа

Для регистрации сигналов в лабораторной работе используется универсальная программа измерения медленно меняющихся электрических сигналов. Она позволяет проводить одновременное измерение нескольких сигналов и стоить их в зависимости от времени или одной из измеряемых величин. Для этого несколько приборов опрашиваются в едином цикле, длительностью от

одной до нескольких десятых секунды. Программа может взаимодействовать с нановольтметром Keithley 2182, а также мультиметрами Keithley 2010, Keithley 2110 и Agilent , подсоединенными к компьютеру посредством COM, USB или GPIB порта. Измеряемыми величинами являются токи, напряжения, сопротивления и температуры.

Каждый сигнал обрабатывается в отдельном канале измерений, основой которого служит один из опрашиваемых приборов. При подсоединении прибора к программе выбирается тип измеряемого сигнала, настраиваются пределы измерения и друге аппаратные возможности прибора. Для получения значения измеряемого параметра показания прибора подвергаются ряду преобразований. Сигнал, поступающий с устройств, имеющих собственные пределы измерений, можно привести в соответствие с ними, умножив на нужные коэффициенты. Для величин, нелинейно связанных с измеряемым сигналом, предусмотрена возможность пересчета сигнала в значение величины с помощью калибровочной кривой. При измерении параметров сложных взаимосвязанных процессов сигнал можно преобразовать с помощью стандартных математических функций, аргументами которых могут выступать, как сам сигнал, так и значения величин других каналов измерений.

Полученные значения параметров вместе с значением времени их регистрации заносятся в массив данных, хранящийся в памяти компьютера и периодически сохраняемый в резервный файл. Массив используется для графического отображения данных на дисплее компьютера, на который можно вывести кривые изменения параметров от времени или от одного из измеряемых параметров.

При сохранении данных имеется возможность сформировать паспорт измерения. Данные сохраняются в простой текстовый файл, в начале которого находится паспорт измерения и описания каналов измерений, содержащие информацию о конфигурациях приборов и всех преобразованиях, совершенных при пересчете их показаний. За описаниями следует массив данных, состоящий

из строк с значениями измеренных параметров, разделенными запятыми, и временем их регистрации.

Каждая кривая, т. е. каждый параметр, строится относительно собственной оси ординат.

Конфигурация приборов, используемых для регистрации сигналов, приводится далее для справки. Изменять ее не рекомендуется.

На рис. 2.1 и 2.2 показаны окна меню `Settings` измерительной программы. Слева — окно подключения приборов `Devices`, справа — окно настройки вывода их показаний `Channels`.

Сигналы регистрируют мультиметры Keithley 2110, подключенные к ПК посредством USB-соединения.

Значения тока измеряются и выводятся в амперах. Они служат разверткой для отрисовки сигнала поглощения в окне измерительной программы. Поля в нижней части `Min` и `Max` правой панели задают границы оси абсцисс графика в окне измерительной программы. Расположенное ниже поле `Step` устанавливает частоту точек, выводимых на график. Для величины, откладываемой по оси абсцисс, в этом поле задается минимальное расстояние между точками Δx. Показания, отличающиеся от последнего выведенного на график значения x на меньшую величину, запоминаются, но на графике не отображаются. Значение `<<0>>` означает вывод всех регистрируемых сигналов.

Показания вольтметра, измеряющего сигнал абсорбции в вольтах, пересчитываются в удобные для восприятия величины. Для этого они переводятся в милливольты умножением на 1000 в поле `Function(x)` правой панели. Так как детектируемый сигнал имеет отрицательную полярность, показания инвертируются. Поля `Min` и `Max` задают границы оси ординат графика в окне измерительной программы. Поле `Step` задает частоту точек, выводимых на график. Значения `<<1>>`, `<<2>>`, `<<3>>` и т. д. означают вывод с шагом Δx, $2\Delta x$, $3\Delta x$ и т. д.

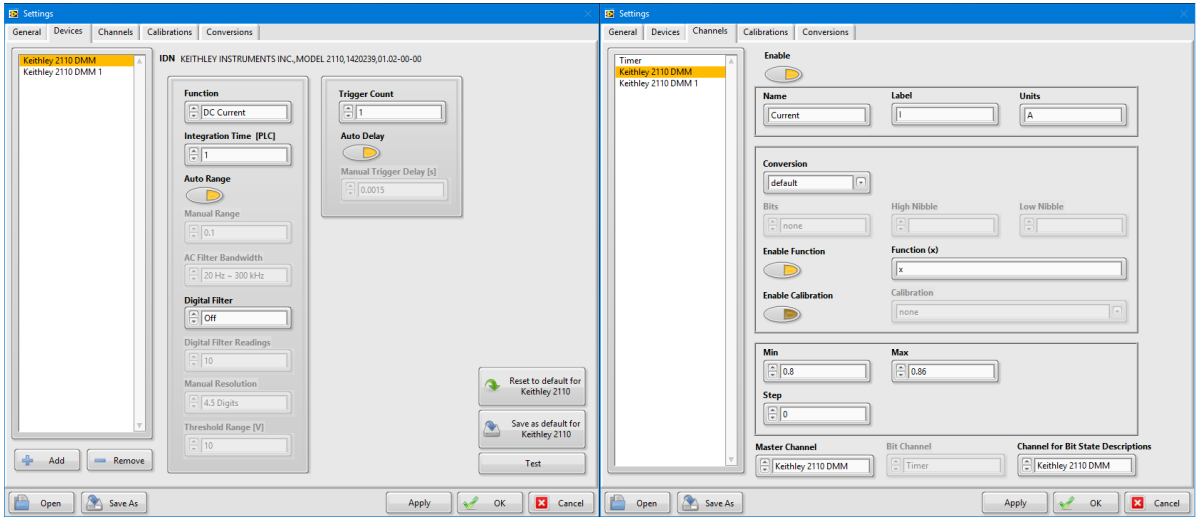

Рис. 2.1. Конфигурация регистрации тока магнита. Ток измеряется в амперах. Значения тока служат разверткой для отрисовки сигнала поглощения, измеряемого вторым мультиметром

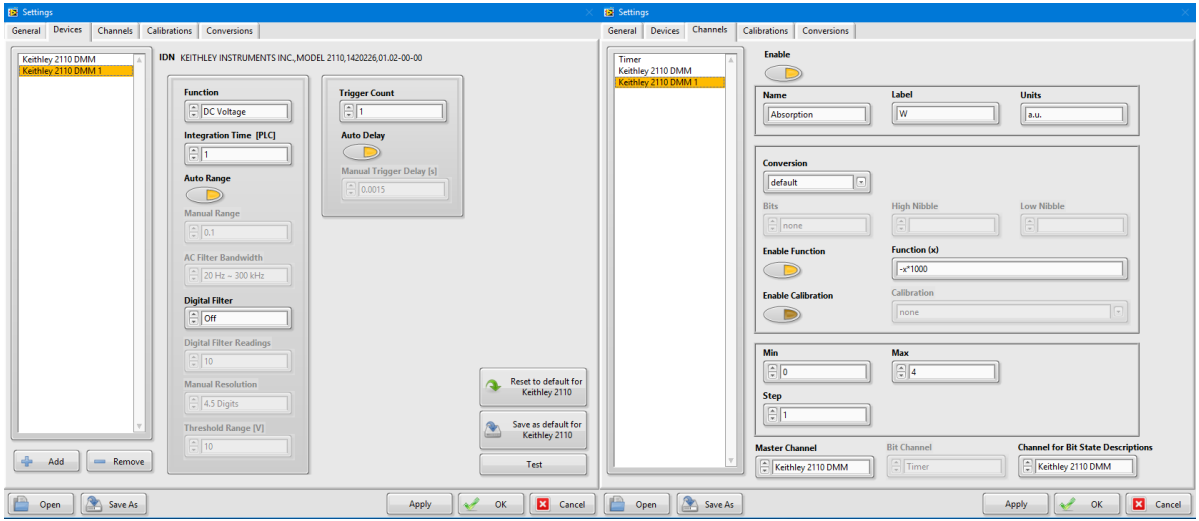

Рис. 2.2. Конфигурация регистрации сигнала поглощения. В поле `Function(x)` правой панели измеряемый сигнал переводится в милливольты и инвертируется

Список литературы

1. Coey J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials. — New York : Cambrige University Press, 2010. — P. 617. — ISBN: 9780511845000.

2. Гуревич А. Г., А. Мелков Г. Магнитные колебания и волны. — Москва : Наука, Физматлит, 1994. — С. 464. — ISBN: 5-02-014366-9.

3. Боков В. А. Физика магнетиков. — Санкт-Петербург : Невский Диалект, 2002. — С. 271. — ISBN: 5-7940-0118-6.

4. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. — Москва : Издательство Московского университета, 1976. — С. 367.

5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — Москва : Наука, Физматлит, 1992. — Т. VIII. — С. 664. — ISBN: 5-02-014673-0.

6. Физические величины. Справочник / под ред. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. — Москва : Энергоатомиздат, 1991.

7. Osborn J. A. Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid // Phys. Rev. — 1945. — Jun. — Vol. 67. — P. 351–357.

Список иллюстраций

1.1 Схема взаимной ориентации приложенных полей, намагниченности и легких осей 6
1.2 Полевые зависимости компонент тензора магнитной восприимчивости χ_1 (a) и χ_2 (b) при $\alpha = 0.01$ . . 8
1.3 Линия поглощения ферромагнитного резонанса при $\alpha = 0.01$ 9
2.1 Основные элементы экспериментальной установки 14
2.2 Окна управляющей и измерительной программ . . 19
2.3 Ячейка кристаллической структуры железо-иттриевого граната 20
2.4 Угловые зависимости функций магнитной анизотропии 22
3.1 Верхняя часть окна измерительной программы . . . 23
3.2 Окно настройки измерений 24
3.3 Завершение работы измерительной программы . . 29
4.1 Угловая зависимость резонансного поля 30

1.1 Окна управляющей программы 33
2.1 Конфигурация регистрации тока магнита 39
2.2 Конфигурация регистрации сигнала поглощения . 40

2.1 Окно настроек управляющей программы 41

Оглавление

1 Теория ферромагнитного резонанса 3
1.1 Линия поглощения 4
1.2 Размагничивающий эффект 9
1.3 Магнитная анизотропия 12
2 Методика экспериментов 13
2.1 Экспериментальная установка 13
2.2 Автоматизация измерений 17
2.3 Образец 20
2.4 Процедура измерений 21
3 Порядок выполнения работы 22
3.1 Подготовка к измерениям 22
3.2 Проведение измерений 26
3.3 Окончание работы 28
4 Обработка результатов измерений 29
5 Контрольные вопросы 31

A Приложения **32**
1 Управляющая программа 32
2 Измерительная программа 36

B Настройка управляющей программы **41**

Список литературы **42**

Список иллюстраций 43

Андрей Николаевич Егоров
Алексей Владимирович Кузнецов
Олег Борисович Маврицкий

Ферромагнитный резонанс

Лабораторный практикум

Редактор ???
Оригинал-макет изготовлен А.В. Кузнецовым

Подписано в печать ??.??.2021. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. ?,??. Уч.-изд. л. ?,??. Тираж 100 экз.
Изд. № . Заказ № .

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ».
Типография НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31.