

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
РАДИОТЕХНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)"

## **ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы

Москва 2008

Составители: В.Ф. Мещеряков, И.В. Гладышев

Редактор: А.И. Морозов

Методические указания содержат описания и краткий теоретический материал к лабораторной работе по изучению электронного парамагнитного резонанса, предлагаемых студентам МИРЭА специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» по курсу «Физика твердого тела» и специальности 210601 «Нанотехнологии в электронике» по курсу «Физика конденсированного состояния».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Московского государственного образовательного учреждения высшего, профессионального образования института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета).

Рецензенты: А.А. Буш  
Л.М. Лазаренко

© Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), 2008

## Работа № 4

# ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

### Содержание

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ .....	4
НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ .....	4
1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ .....	5
МИКРОЧАСТИЦ .....	5
1.1. Понятие магнитного момента .....	5
1.2. Квантование момента количества движения и магнитный момент элементарных частиц.....	8
1.4. Введение в теорию магнитного резонанса.....	13
1.4.1. Условие магнитного резонанса .....	13
1.4.2. Ширина линии и время релаксации магнитного резонанса .....	15
2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ .....	17
2.1. Описание установки для наблюдения электронного парамагнитного резонанса.....	17
2.2. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА.....	21
2.2.1. Цель работы: .....	21
2.2.2. Задание: .....	21
2.2.3. Порядок выполнения работы .....	22
2.2.4. Обработка результатов измерений .....	22
2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЭПР) .....	23
2.3.1. Цель работы: .....	23
2.3.2. Задание: .....	23
2.3.3. Порядок выполнения работы .....	23
2.3.4. Обработка результатов измерений .....	24

2.4. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ СДАЧИ ЗАЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ .....	24
ЛИТЕРАТУРА: .....	25

### ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

$$1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} \longrightarrow \begin{cases} 11604,5 \text{ К} \\ 8065,5 \text{ см}^{-1} \\ 2,42 \cdot 10^{14} \text{ Гц} \end{cases}$$

### НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ в системе СИ

Постоянная Планка	$\hbar$	$1,06 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Заряд электрона	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Скорость света	$c$	$3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$
Масса электрона	$m_e$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

# 1. НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ ФИЗИКИ МИКРОЧАСТИЦ

## 1.1. Понятие магнитного момента

В физике магнитных явлений одним из основных понятий является понятие магнитного момента. Если в теории электричества, силы, действующие между частицами, определяются их зарядами, то в теории магнетизма рассматриваются силы, действующие между движущимися зарядами. Магнитные поля, создаваемые зарядами описываются законом Био-Савара-Лапласа, а возникающие при этом силы – законом Ампера. В тех случаях, когда расстояние между областями, в которых протекают локальные токи, много больше размеров этих областей, магнитные поля, создаваемые этими токами на больших расстояниях можно представить в виде разложения по мультипольным: дипольному, квадрупольному и т. д. моментам. [1]. Основным из них является дипольный момент, который ниже будем называть просто магнитным моментом. Примером тела, обладающего магнитным моментом в отсутствие внешнего магнитного поля, является стрелка компаса. Если приблизить стрелки двух компасов одноименными полюсами, то эти стрелки будут отворачиваться друг от друга (отталкиваться), а при сближении стрелок разноименными полюсами – притягиваться друг к другу. Главное свойство стрелки компаса – стремление ориентироваться вдоль магнитного поля (рис. 1). На самом деле стрелка компаса представляет собой маленький магнит. Оказывается, что даже такие частицы как электрон, протон и нейтрон также обладают магнитным моментом, но очень маленьким. Для сравнения, величина магнитного момента магнита из самарий-кобальтового сплава объемом  $1 \text{ см}^3$  составляет  $\cong 0.2 \text{ А м}^2$ , а электрона  $0.921 \times 10^{-23} \text{ А м}^2$ .

Характерным свойством объектов обладающих магнитным моментом являются:

- в магнитном поле на эти объекты действуют силы;
- эти объекты являются источниками магнитного поля.

Так, например, железные изделия втягиваются в области, где магнитное поле самое большое, а изменять положение стрелки

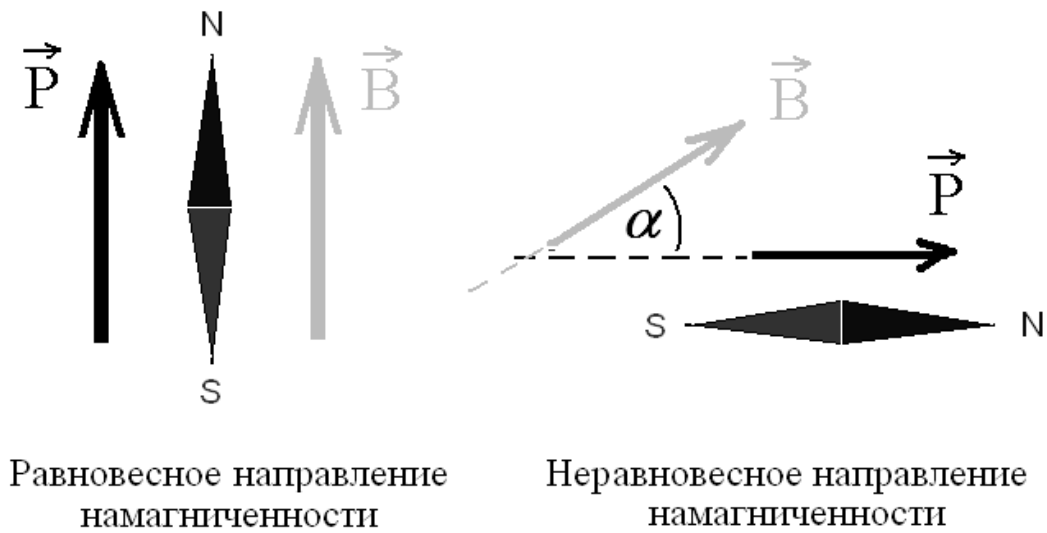


Рис. 1. Ориентации магнитных моментов относительно направления магнитного поля.

компыа можно с помощью магнитного поля, создаваемого магнитом.

Указанными выше свойствами обладает, хорошо изученная в курсе общей физики рамка с током (рис. 2). Этот объект позволяет пояснить не только физическую природу происхождения

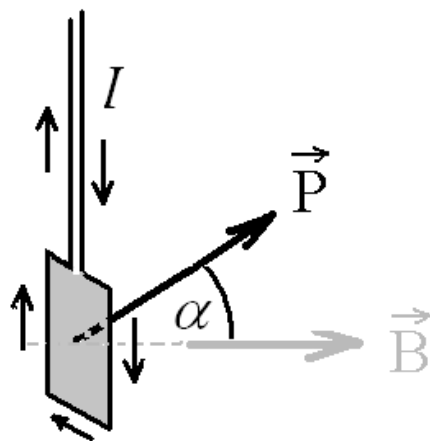


Рис. 2. Ориентация магнитного момента рамки с током относительно направления магнитного поля.

сил, действующих на объекты, обладающие магнитным моментом, но также и провести градуировку приборов для измерений абсолютной величины магнитного момента. В общем курсе физики величину магнитного момента рамки с током определяют как [1]

$$\vec{P} = I \cdot S \cdot \vec{n}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока ( $A$ ),  $S$  – площадь, охватываемая рамкой с током ( $m^2$ ),  $\vec{n}$  – единичная нормаль к поверхности рамки, направление нормали образует с направлением тока правый винт.

На магнитный момент  $\vec{P}$ , помещенный в магнитное поле, действует вращающий момент, величина которого определяется выражением

$$\vec{K} = [\vec{P}, \vec{B}], \quad (2)$$

где  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля ( $Tл$ ).

В магнитном поле потенциальную энергию магнитного момента записывают в виде скалярного произведения:

$$E = -(\vec{P}, \vec{B}). \quad (3)$$

Минимум энергии соответствует равновесному состоянию, когда магнитный момент направлен вдоль магнитного поля. В случае, когда магнитный момент ориентирован против поля, энергия максимальна. В неоднородном магнитном поле на объект, обладающий магнитным моментом, действует не только вращающий момент, но также и перемещающая сила  $F$ , которая в случае одного измерения, когда магнитное поле направлено вдоль оси  $x$  и  $P_x = const$ , как следует из (3), принимает вид:

$$F_x = -\frac{\partial E}{\partial x} = P_x \frac{\partial B}{\partial x} \quad (4)$$

Как видно, если  $P_x > 0$ , то эта сила втягивает обладающий маг-

нитным моментом объект в магнитное поле, а при  $P_x < 0$  – выталкивает.

## 1.2. Квантование момента количества движения и магнитный момент элементарных частиц

Любое вещество состоит из атомов. Атомы образованы из ядер, в состав которых входят нейтроны и протоны, и электронной оболочки. Электроны, протоны и нейтроны обладают спином - собственным механическим моментом количества движения, который обозначим как  $\mu_{мех}$ . Его величина равна  $\mu_{мех} = S \cdot \hbar$ , где  $S=1/2$  – спиновое число,  $\hbar = 1.06 \times 10^{-34}$  Дж·с - постоянная Планка. Как известно из квантовой механики, измеряемой величиной является только одна из проекций момента количества движения, например, вдоль оси  $z$ , которая, может принимать в случае электрона, протона и нейтрона только два значения  $\pm \hbar/2$ , то есть квантуется. Это утверждение запишем в виде:  $(\mu_{мех})_z = m_S \cdot \hbar$ , где  $m_S = \pm 1/2$ . Указанные частицы обладают также магнитным моментом, который обозначим буквой  $\mu$ , и как экспериментально установлено, связан со спином простым соотношением:

$$\mu = \gamma \cdot \mu_{мех} \quad (5)$$

где величину

$$\gamma = \frac{e \cdot g}{2 \cdot m}, \quad (6)$$

определяющую отношение магнитного момента к механическому, называют гиромагнитным отношением а коэффициент пропорциональности  $g$  называют  $g$ -фактором. Здесь  $e=1,6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд электрона, а  $m$  – масса частицы.

Частицу обладающую магнитным моментом называют парамагнитной. Парамагнитными частицами кроме электронов, протонов и нейтронов могут быть атомы и молекулы, как правило, с нечётным числом электронов (например, атомы азота и водорода, молекулы NO); свободные радикалы (например,  $CH_3$ ); ионы с частично заполненными внутренними электронными обо-



лочками (например, ноны переходных элементов); центры окраски в кристаллах, в качестве которых могут быть электроны, находящиеся на местах отсутствующих атомов кристаллической решетки; примесные атомы (например, доноры в полупроводниках); электроны проводимости в металлах и полупроводниках. Магнитный момент электронной оболочки атомов и молекул по величине оказывается порядка магнетона Бора,

$$\mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_e} = 0.927 \times 10^{-23} \text{ А} \cdot \text{м}^2, \quad (7)$$

где  $m_e$  – масса электрона, а магнитный момент ядер порядка ядерного магнетона

$$\mu_J = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_p} = 5.05 \times 10^{-27} \text{ А} \cdot \text{м}^2, \quad (8)$$

где  $m_p$  – масса протона. Поскольку масса протона почти в 2000 раз больше массы электрона ( $m_p / m_e = 1835$ ), то во столько же раз магнетон Бора больше ядерного магнетона.

Магнитный момент парамагнитной частицы записывают в виде

$$\mu = g \mu_B S. \quad (9)$$

Для электрона g-фактор  $g=2.0023$  и поэтому, как следует из (5), (6) и (7) его магнитный момент с большой точностью равен  $1 \mu_B$ .

В классической физике направление магнитного момента относительно какого-либо направления (например, направления магнитного поля) может принимать любые значения (см. рис. 1). В квантовой механике показывается [2], что, во-первых, можно измерить только одну из компонент магнитного момента (например, вдоль оси  $z$ ), а во-вторых, проекция магнитного момента на эту ось квантуется, то есть может принимать только дискретный ряд значений, что может быть записано в виде:

$$\mu_z = g \cdot \mu_B \cdot m_S, \quad (10)$$

где абсолютная величина  $m_S$  может меняться на единицу. Например, для спина  $S=1/2$   $m_S=\pm 1/2$ , для  $S=3$   $m_S=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ . (рис. 3)..

### 1.3. Магнитный момент атомов в кристаллической решетке

Поскольку магнитные моменты ядер на три порядка меньше магнитных моментов электронов, то магнитный момент атомов и молекул определяется спиновыми магнитными моментами отдельных электронов и магнитными моментами, создаваемыми орбитальным движением электронов вокруг ядер. Их суммарный магнитный момент определяет намагниченность вещества. Суммарный магнитный момент полностью заполненной оболочки равен нулю, поэтому магнитный момент атомов и молекул определяется электронами незаполненных оболочек. Электроны внешних оболочек обуславливают химическую активность атома и, при соединении атомов в молекулы, образуют, как правило, связанные пары с нулевым магнитным моментом. Атомы со спаренными электронами в отсутствие магнитного поля не обладают собственным магнитным моментом, а в магнитном поле приобретают магнитный момент, направленный против внешнего поля. Это свойство называют диамагнетизмом, а вещества, состоящие только из таких атомов, – диамагнетиками. Этот магнитный момент возникает вследствие “деформации” электронных оболочек атомов под действием магнитного поля. Величина этого момента

$$S=1/2, \quad m_s=\pm 1/2$$

$$S=3, \quad m_s=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$$

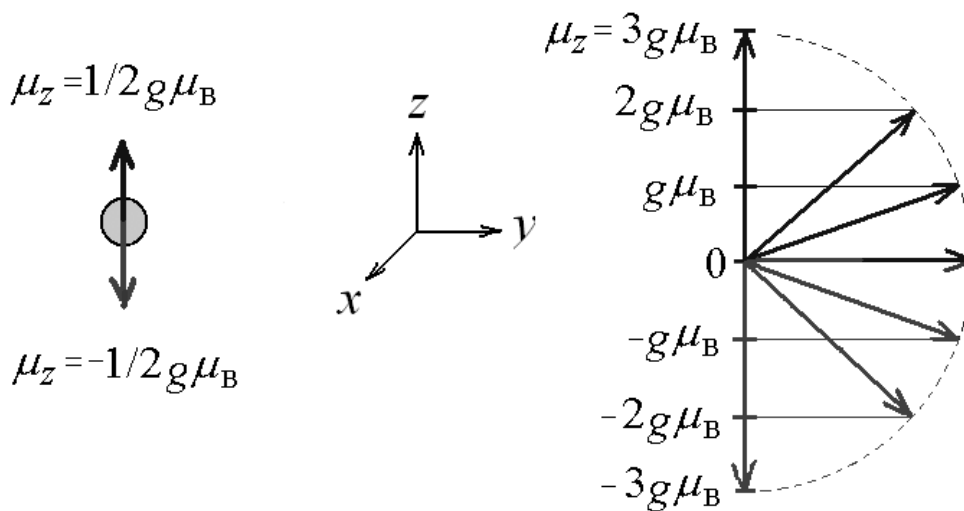


Рис. 3. Проекция намагниченности атомов для  $S=1/2$  и  $S=3$

по абсолютному значению в десять - сто раз меньше, чем у атомов, которые имеют недостроенные внутренние оболочки.

Электроны, находящиеся на внутренних оболочках, в образовании химических связей не участвуют. Поэтому при наличии незаполненной внутренней оболочки атом будет обладать отличным от нуля магнитным моментом в любом химическом соединении. К таким атомам относятся 3d-элементы группы железа (Sc÷Ni), 4d-элементы группы палладия (Y÷Pd), 5d-элементы группы платины (Hf÷Pt), 4f-элементы группы редких земель (или лантаноидов) и 5f-элементы группы актиноидов. Понятие магнитного момента сохраняется и у атомов, находящихся в кристалле в окружении соседних атомов, несмотря на то, что размеры атомов и межатомное расстояние, то есть расстояние, на котором они взаимодействуют, сравнимы. Влияние кристаллического окружения на магнитный момент атомов переходных элементов зависит от того, насколько сильно экранированы электроны незаполненных оболочек от электрического поля, создаваемого окружающими атомами или ионами (далее кристаллического поля).

В случае атомов или ионов редкоземельных металлов с незаполненной 4f оболочкой, и актиноидов экранирование незаполненных оболочек оказывается, как правило, достаточно сильным для того, чтобы состояние магнитного иона менялось несущественно при их помещении в кристаллическую решетку.

Наиболее сильное влияние кристаллических полей на структуру энергетических уровней 3d-электронов проявляется для атомов переходной группы железа (Mn, Fe, Co, Ni и т. д.). В зависимости от вида атомных орбиталей, на которых находятся эти электроны, действие на них окружающих атомов будет различным. На рис. 4 показан вид распределение электронной плотности для двух  $\psi$  - функций, соответствующих 3d – состоянию электронов парамагнитного иона, находящегося в окружении диамагнитных анионов. Как видно из этого рисунка энергия электронов, находящихся на атомных орбиталях  $\psi_1$  наиболее близко расположенных по отношению окружающим их атомам из-за кулоновского взаимодействия будут обладать большей энергией, чем электроны, находящиеся на более удаленных от

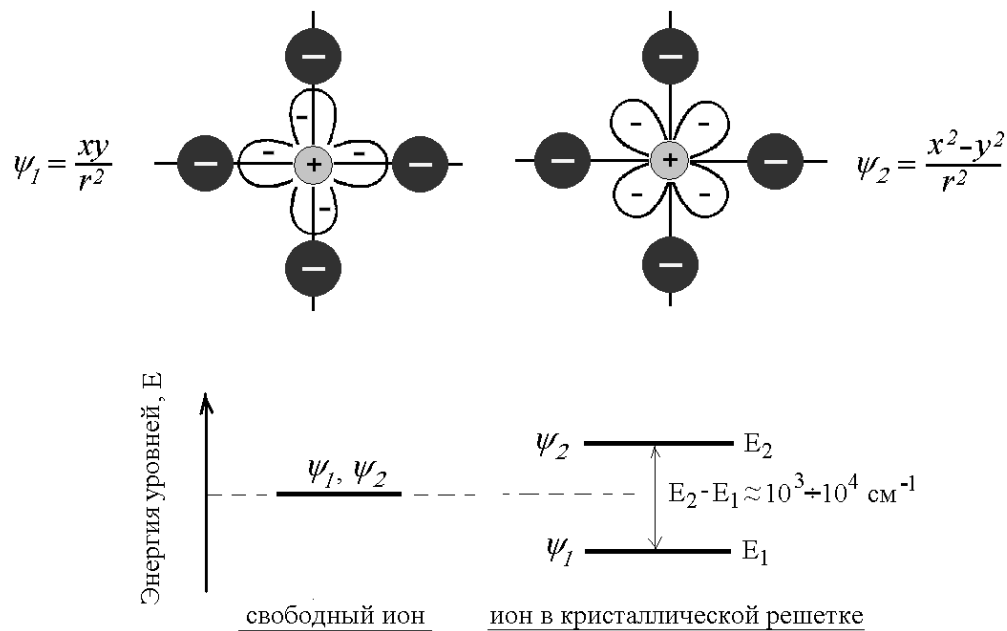


Рис. 4. На верхних рисунках показано распределение электронной плотности для двух d-орбиталей парамагнитного иона, находящихся в электрическом поле окружающих анионов, а на нижнем – положение их уровней энергии для иона, свободного (слева), и находящегося в кристаллической решетке.

окружающих атомов орбиталях  $\psi_2$ . Если для свободных атомов эти орбитали обладали одинаковой энергией, то в кристаллической решетке этим орбиталям будут соответствовать разные значения энергии. Энергия расщепления уровней оказывается существенно больше тепловой энергии  $\varepsilon = kT$  где  $k$  – постоянная Больцмана, и поэтому при обычных температурах населенными оказываются только нижние уровни. Поскольку каждому уровню соответствует свое значение орбитального момента, то в конечном итоге, в магнитном поле величину проекции магнитного момента атома на направление поля можно описать выражением (9) с определенными значениями g-фактора и эффективного спина S. Величина последнего определяется числом заселенных уровней. Анизотропия g-фактора (разница значений g-фактора при при-

ложении магнитного поля вдоль разных кристаллических направлений) определяется симметрией ближайшего окружения магнитного атома или иона.

Таким образом, если в основном состоянии свободного магнитного атома (иона) его орбитальный момент отличен от нуля, то в кристаллической решетке этот ион будет описываться  $g$ -фактором и величиной эффективного спина, которые определяются кристаллическим окружением парамагнитного иона. Если же орбитальный момент свободного магнитного атома (иона) равен нулю, то в кристаллической решетке величина спина не изменится, а величина  $g$ -фактора будет мало отличаться от  $g$ -фактора электрона.

#### 1.4. Введение в теорию магнитного резонанса

##### 1.4.1. Условие магнитного резонанса

Рассмотрим частицу со спином  $S=1/2$ , обладающую магнитным моментом  $\mu$  и находящуюся в магнитном поле  $B$ . Ее магнитный момент может ориентироваться только вдоль или против поля. Тогда энергия взаимодействия частицы с магнитным полем, согласно формуле (3), может принимать одно из двух значений:

$$\begin{aligned} E_1 &= -\mu B \\ E_2 &= +\mu B \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, в присутствии магнитного поля снимается вырождение<sup>1</sup> по направлению спина и вместо одного, возникают два уровня энергии, разность между которыми равна

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2\mu B \quad (12)$$

Под воздействием внешнего переменного высокочастотного электромагнитного поля определенной частоты между этими уровнями возможны переходы, связанные как с поглощением, так и с излучением электромагнитной волны. При переходе с ниж-

---

<sup>1</sup> Вырождение уровней энергии квантово-механической системы состоит в том, что одному и тому же значению энергии системы соответствуют  $n$  различных квантовых состояний. Число  $n$  называется кратностью вырождения уровня.

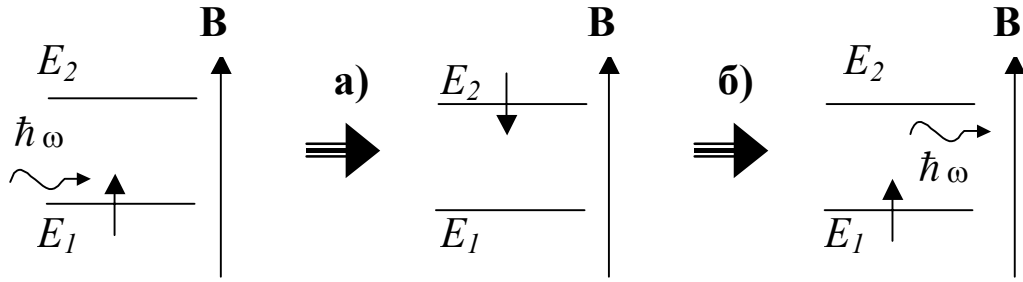


Рис. 5. Поглощение (а) и испускание (б) кванта электромагнитного излучения для спина  $S=1/2$ . Направления магнитного момента, соответствующие определенному значению энергии обозначены стрелкой.

него уровня энергии на верхний квант энергии электромагнитной волны - фотон поглощается. При переходе же с верхнего уровня на нижний, происходит испускание кванта электромагнитного излучения, и энергия системы уменьшается. В состоянии частицы с меньшей энергией  $E_1$  (нижний уровень) ее магнитный момент направлен вдоль магнитного поля, а в состоянии с меньшей энергией  $E_2$  (верхний уровень) – против поля (см. рис. 5).

Из общего курса физики известно [3], что электромагнитное излучение поглощается только тогда, когда энергия фотона равна разности энергий разрешенных состояний частицы (например, электрона, атома, ядра). Так как энергия фотона равна  $\hbar\omega$  то, приравнявая энергию кванта внешнего электромагнитного излучения разности энергий уровней  $\Delta E$  (см. рис. 6), можно найти резонансное значение частоты поглощения:

$$\hbar\omega = \Delta E = 2\mu B \quad (13)$$

где круговая частота  $\omega = 2\pi f (c^{-1})$ , а  $f$  – частота (Гц). Если выразить магнитный момент через g-фактор (см. (10)), то это уравнение запишется в виде:

$$\hbar\omega = g\mu_B B. \quad (14)$$

Обычные электромагниты позволяют получать магнитные поля порядка нескольких десятых Тл. Для таких магнитных полей частота наблюдения ЭПР лежит в СВЧ диапазоне порядка 10 ГГц.

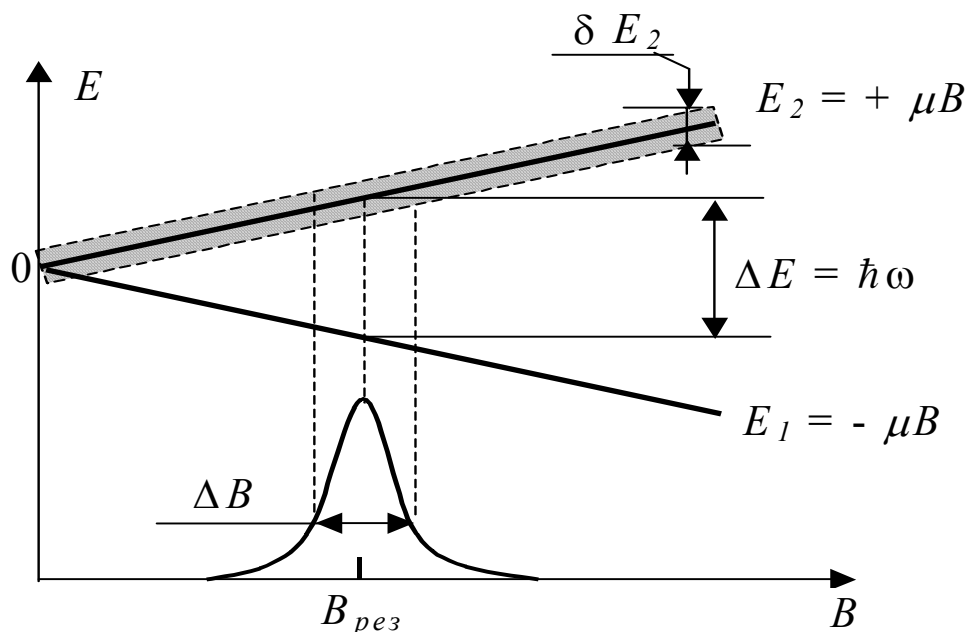


Рис. 6. Условие резонансного поглощения.

Таким образом, возбуждение электромагнитным полем резонансных переходов электронов обусловленных изменением направления магнитного момента атомов, молекул или их образований, носит название электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). ЭПР был открыт Е. К. Завойским в 1944 году. Начиная с 1922 года, в ряде работ высказывались соображения о возможности существования ЭПР. Попытка экспериментально обнаружить ЭПР была предпринята в середине 30-х гг. нидерландским физиком К. Гортером с сотрудниками. Однако ЭПР удалось наблюдать только благодаря радиоспектроскопическим методам, разработанным Е. К. Завойским.

#### 1.4.2. Ширина линии и время релаксации магнитного резонанса

Важной характеристикой линий резонансного поглощения является ее ширина. Наблюдаемую ширину линии можно трактовать как “размытие” уровня энергии возбужденного состояния (см. рис. 6). В свою очередь, ширина уровня ( $\delta E$ ) связана со временем нахождения частицы в возбужденном состоянии. Это вре-

мя носит название времени релаксации<sup>2</sup> и обычно обозначается буквой  $T$ . Чем больше время релаксации, тем большее время частица находится в возбужденном состоянии и уже ширина линии.

Время релаксации уменьшается при взаимодействии магнитного момента парамагнитной частицы между собой и с кристаллической решеткой. Соответственно с этим различают два механизма релаксации, которые называют спин-спиновой и спин-решеточной релаксациями. Исследования релаксационных процессов, ширины линии электронного парамагнитного резонанса дают сведения о структуре жидкостей и твёрдых тел.

Оценить величину времени релаксации можно, если воспользоваться соотношением неопределенности, которое в нашем случае принимает вид:

$$\delta E \cdot T \geq \hbar. \quad (15)$$

В результате получаем

$$\delta E \cdot \approx \frac{\hbar}{T}, \quad (16)$$

или для ширины линии  $\Delta f = \omega / 2\pi$  в Гц

$$\Delta f \approx (2\pi T)^{-1}, \quad (17)$$

Используя (14) из (17) в для ширины линии, выраженной в Гл, получим:

$$\Delta B = \frac{\hbar}{2\mu T} \quad (18)$$

Измеряют ширину линии поглощения обычно на ее полувысоте.

Возможность наблюдения магнитного резонанса ограничена. Это связано, как уже упоминалось выше, с необходимостью наличия у атомов или ионов ненулевого магнитного момента. Другое ограничение связано с температурой. Во-первых, интенсивность поглощения пропорциональна разности заселенностей уровней, между которыми происходят переходы. С понижением температуры эта разность растет и поэтому интенсивность поглощения увеличивается. Во-вторых, у ионов с большим вкладом орбитального момента колебания кристаллической решетки силь-

---

<sup>2</sup> Релаксацией называется самопроизвольный переход системы из возбужденного в стационарное состояние.



но уменьшают время нахождения атома в возбужденном состоянии. Уменьшить этот вклад можно, только понижая температуру образца. Поэтому при комнатных температурах наблюдают линию ЭПР только в кристаллах, содержащих атомы, магнитный момент которых определяется только спинами электронов, а орбитальный вклад очень мал ( $g \approx 2$ ). К таким ионам относятся ион  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Gd}^{3+}$  и т. д. Поэтому в большинстве случаев линию ЭПР наблюдают, как правило, при очень низких температурах (менее 10 К).

## 2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

### 2.1. Описание установки для наблюдения электронного парамагнитного резонанса

Общий вид установки для наблюдения резонансного поглощения приведен на рис. 7, а ее блок-схема на рис. 8. При наблюдении ЭПР измеряют поглощение переменного электромагнитного поля в зависимости от величины индукции внешнего постоянного магнитного поля. Резонансное поглощение наблюдается в том случае, когда выполняется соотношение (13) между частотой и величиной магнитного поля. Источником переменного поля в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) служит клистрон, который обозначен на рис. 8 цифрой 1. Постоянное магнитное поле в образце создается с помощью электромагнита 4 (см. рис.7, 8).

Частота генерируемых клистроном колебаний лежит в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) и указана на градуировочном графике электромагнита<sup>3</sup>. Для передачи таких высокочастотных колебаний используют волноводы, поперечные размеры которых сравнимы с длиной волны. Клистрон подсоединен к блоку питания, который на том же рисунке обозначен цифрой 2. Поглощение в веществе, связанное с магнитным резонансом, очень мало, и поэтому для его усиления применяют резонатор – устройство, позволяющее увеличивать амплитуду колебаний электромагнит-

<sup>3</sup> По порядку величины частота около  $9 \cdot 10^9$  Гц (длина волны  $\approx 3$  см)

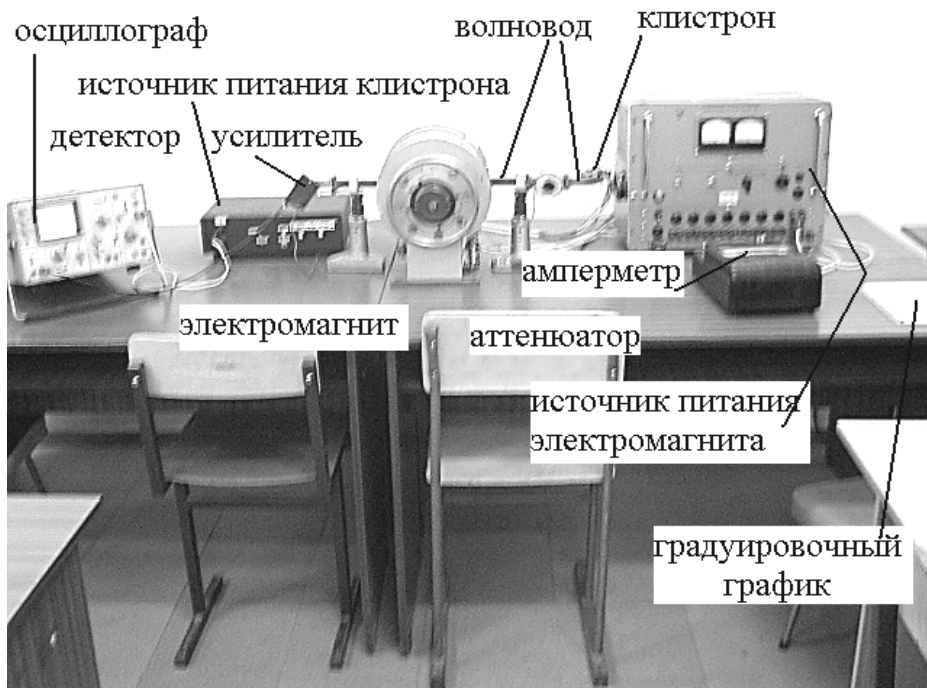


Рис. 7. Общий вид установки для наблюдения парамагнитного резонанса.

ного поля в месте нахождения образца. В резонаторе, в зависимости от его геометрических размеров, возникают различные типы колебаний, в которых магнитная и электрическая компоненты высокочастотного поля имеют определенное пространственное распределение (конфигурацию). Резонатор 3 представляет собой отрезок волновода поперечного размера  $23 \times 10$  мм, закрытый с двух сторон перегородками, имеющими отверстия для передачи СВЧ мощности. Распределение магнитных силовых линий высокочастотного поля в таком резонаторе показано на рис. 7 пунктирной линией.

В качестве образца в данной работе используется органическое вещество дифенилпетрилгидразил (ДФПГ). Его особенность заключается в том, что на одной из его орбиталей существует неспаренный электрон. Ампула с исследуемым образцом помещается в пучности магнитной компоненты СВЧ поля резонатора, то есть там, где эта амплитуда максимальна. Питание катушек электромагнита осуществляется от блока питания 5. Величина тока, текущего через катушки электромагнита, контролируется с по-

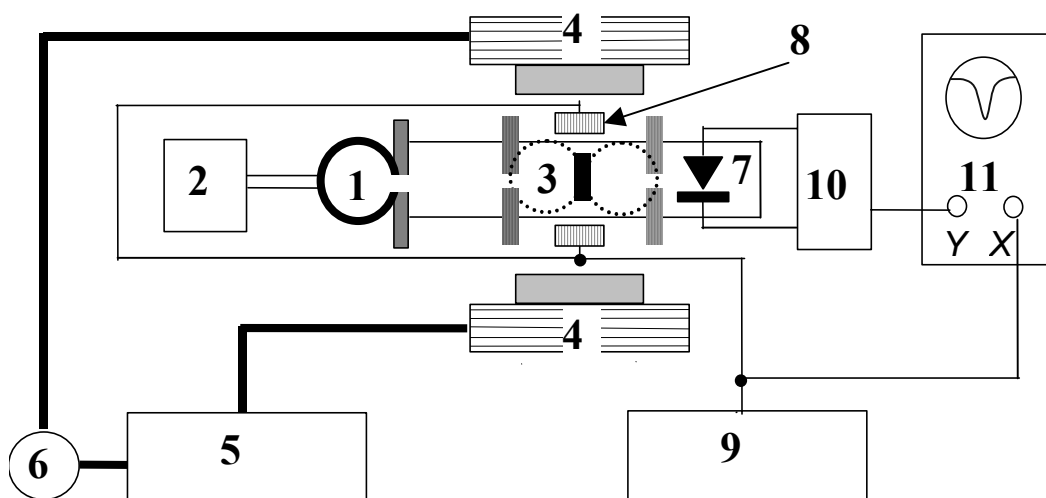


Рис. 8. Блок-схема установки по измерению электронного парамагнитного резонанса.

1 – клистрон, 2 – источник питания клистрона, 3 – СВЧ резонатор, 4 – катушки электромагнита, 5 – источник питания электромагнита, 6 – амперметр, 7 – СВЧ детектор, 8 – модуляционные катушки, 9 – генератор частоты модуляции, 10 – усилитель, 11 – осциллограф.

мощью амперметра 6. Резонатор с образцом помещают в зазор между полюсами электромагнита. Прошедшая через резонатор СВЧ мощность поступает на детектор 7, представляющий собой диод, ток которого пропорционален падающей на него мощности. Если при каждом значении магнитного поля измерять ток детектора, то таким образом по точкам можно получить кривую резонансного поглощения. Однако если к внешнему постоянному магнитному полю добавить переменное магнитное поле низкой частоты (50 Гц) так, чтобы его амплитуда была в несколько раз больше ширины резонансной линии, то сигнал поглощения можно наблюдать на экране осциллографа.

На рис. 9 показано, как при этом будет меняться ток детектора в зависимости от времени, при условии, что величина постоянного магнитного поля удовлетворяет условию резонанса. Для создания этого дополнительного низкочастотного переменного магнитного поля к широкой стенке резонатора прикреплены две катушки 8 (см. рис. 8), на которые подается переменное напряже-

ние частоты 50 Гц. Их называют модуляционными катушками. Напряжение питания модуляционных катушек подается с отдельных клемм блока питания электромагнита. При появлении резонансного поглощения, изменение амплитуды СВЧ колебаний в резонаторе происходит с частотой модуляции. Сигнал этой частоты выделяется детектором, с помощью усилителя **10** усиливается и поступает на вход Y осциллографа **11**. На X вход осциллографа подается сигнал с генератора, питающего модуляционные катушки. В зависимости от полярности диода детектора сигнал ЭПР на экране осциллографа обращен вверх или вниз от горизонтальной линии развертки. Поскольку поле модулирующих катушек проходит точное резонансное значение два раза за каждый период, то при развертке луча осциллографа напряжением модулирующих катушек на экране осциллографа в общем случае видны две кривые сигнала ЭПР (рис. 10).

Наличие двух сигналов объясняется сдвигом фаз между на-

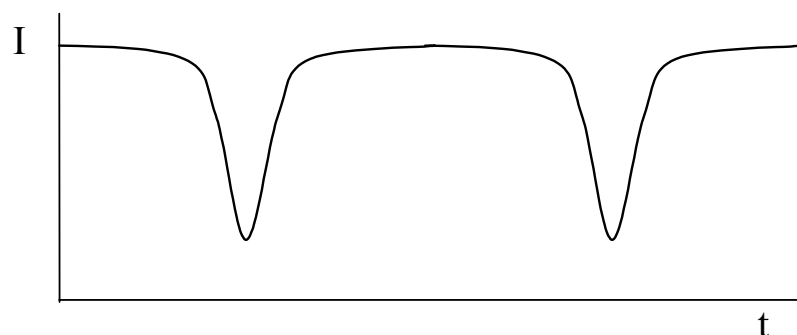


Рис. 9. Временная зависимость тока детектора.

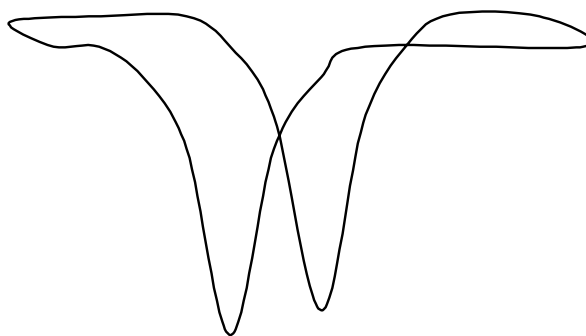


Рис. 10. Наблюдаемый сигнал ЭПР.

пряжением и током модуляционных катушек. Эти кривые можно совместить при помощи фазовращателя “фаза”, ручка которого выведена на лицевую панель блока питания клистрона.

## 2.2. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

### 2.2.1. Цель работы:

Измерение магнитного момента электрона.

### 2.2.2. Задание:

На заданной частоте внешнего излучения определить величину магнитного поля, при котором происходит резонансное поглощение, и вычислить величину магнитного момента электрона и значение g-фактора.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на следующие вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Какие величины необходимо измерить в работе, чтобы вычислить магнитный момент электрона?
3. Какие величины необходимо измерить в работе, чтобы вычислить время релаксации?
4. Что такое магнитный момент?
5. Как ведет себя вещество, обладающее магнитным моментом, при помещении его в магнитное поле?
6. Какая частица называется парамагнитной?
7. Что такое клистрон?
8. Для чего нужны модуляционные катушки?
9. Где помещается образец при наблюдении ЭПР?
10. Как в процессе измерений менять и определять величину магнитного поля?
11. Описать последовательность действий при измерении ширины линии резонанса;
12. Показать на установке клистрон, резонатор, детектор и объяснить их назначение.

### 2.2.3. Порядок выполнения работы

1. Включить питание клистрона, для чего нажать кнопку “*сеть*” на блоке питания клистрона.
2. Включить на осциллографе тумблер “*сеть*”.
3. Включить прогрев ламп источника питания электромагнита и напряжение на модуляционные катушки, для чего включить на блоке питания электромагнита тумблер “*сеть*”. После трехминутного прогрева источника питания клистрона на клистрон будет подано высокое напряжение, и он начнет генерировать высокочастотные колебания, что проявится в появлении шума на экране осциллографа. Если этого не произойдет, необходимо подстроить частоту клистрона на частоту резонатора. Поворачивая ручку “*частота клистрона*” на блоке питания клистрона, следует добиться появления шума или изменения наклона линии на экране осциллографа. Точной настройке частоты клистрона на частоту резонатора соответствует такое положение ручки “*частота клистрона*”, при котором небольшой ее поворот в любую сторону должен приводить к увеличению шумов и отклонению линии от горизонтального положения.
4. Включить тумблером “*анод*” анодное напряжение на выходных лампах источника питания электромагнита. Меняя напряжение на его выходе, добиться появления линии поглощения на экране осциллографа.
5. Установив линию на середине экрана, записать величину тока электромагнита и по градуировочному графику определить поле резонанса.
6. Записать частоту клистрона, которая указана на градуировочном графике.

### 2.2.4. Обработка результатов измерений

1. Вычислить величину магнитного момента и  $g$ -фактор электрона, используя приведенные в описании работы формулы.
2. Рассчитать приборную погрешность определения величины  $g$ -фактора, используя выражение:

$$\Delta g(f, I) = \frac{\partial g}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial g}{\partial I} \Delta I, \quad (19)$$

где  $\Delta f$ ,  $\Delta I$  – погрешности определения частоты клистрона и силы тока.

3. Записать вывод по работе.

## 2.3. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА В ВОЗБУЖДЕННОМ СОСТОЯНИИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА (ЭПР)

### 2.3.1. Цель работы:

Измерение времени нахождения электрона в возбужденном состоянии методом ЭПР.

### 2.3.2. Задание:

Определить ширину линии ЭПР и время релаксации электрона.

Подготовка к выполнению работы состоит в ознакомлении с материалом, позволяющим ответить на следующие вопросы:

1. В чем состоит цель работы?
2. Какие величины необходимо измерить в работе, чтобы вычислить время релаксации?
3. Описать последовательность действий при измерении ширины линии резонанса;

### 2.3.3. Порядок выполнения работы

1. Найти линию резонансного поглощения.
2. Измерить линейкой ширину линии резонанса на половине ее высоты.
3. Провести градуировку экрана осциллографа для чего:
  - а) Изменяя ток электромагнита, сместить линию резонанса сначала в крайнее левое положение, отметить его и запи-

- сать величину тока электромагнита;
- б) Сместить линию резонанса в крайнее правое положение, отметить его и записать величину тока электромагнита;
  - в) Определив по градуировочному графику значения магнитных полей в крайних точках экрана осциллографа и разделив их разницу на расстояние между ними, определить градуировочную постоянную.
4. Используя результаты измерений определить ширину линии резонанса в единицах  $Tл$ .

#### 2.3.4. Обработка результатов измерений

1. Вычислить, используя формулу (18), время релаксации.
2. Рассчитать приборную погрешность определения ширины ЭПР, используя формулу аналогичную формуле (19).
3. Записать вывод по работе.

#### 2.4. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ СДАЧИ ЗАЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Что такое магнитный момент и как влияет магнитное поле на вещество, обладающее магнитным моментом?
2. Какие частицы называют парамагнитными, и атомы каких групп периодической системы Менделеева являются парамагнитными в любом химическом соединении?
3. Какие значения может принимать энергия частицы со спином  $S=1/2$  и магнитным моментом  $\vec{\mu}$  в магнитном поле  $\vec{B}$ ?
4. Что такое g-фактор и чему он равен для свободного электрона?
5. Что такое фотон и чему равна его энергия?
6. Чему должна быть равна энергия фотона для того, чтобы при заданной величине магнитного поля было возможно наблюдать явление магнитного резонанса?
7. Что происходит с магнитным моментом частицы во время резонансного поглощения?
8. Что такое время релаксации и как его определить в работе?



9. Какую физическую величину определяют в работе, используя значение ширины линии магнитного резонанса?
10. Как при выполнении работы определить ширину линии резонанса?
11. Как выразить величину ширины линии резонанса в Гц, если она известна в  $T_l$  и наоборот?
12. Что такое диод и для чего он используется в установке?
13. Написать формулу для определения величины магнитного момента из условия магнитного резонанса.
14. Написать формулу для оценки времени релаксации, если известна ширина линии резонанса в теслах.
15. Нарисовать блок-схему установки для наблюдения электронного парамагнитного резонанса.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982. Т. 2 (§§ 10, 46)
2. Берзин А.А., Морозов В.Г., Основы квантовой механики, Москва, МИРЭА, 2005 г.
3. Морозов А.И. Физика твердого тела: Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники — Москва, МИРЭА, 2008.
4. \*Механика и молекулярная физика: Лабораторный практикум по физике. М.: МИРЭА, 1997. (Введение, Дополнение).
5. \*Лабораторный практикум по общей физике. – М.: Изд-во МФТИ. – 1998. т.3, (с. 251-277, 285-290)
6. \*Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
7. \*Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974.