

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ  
ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И  
ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО  
ЧАСТЬ 6. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ ФЕРМИ И ЭНЕРГИИ  
ФЕРМИ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

*В работе рассмотрен метод измерения энергетического уровня Ферми и метод измерения энергии Ферми исследуемых образцов материалов, их сущность и различия. Приведены уравнения величин, используемые при определении данных величин. Показаны некоторые результаты экспериментальных исследований. Описаны технические решения ряда магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми, возможные варианты их совершенствования. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольные методы и средства измерения уровня и энергии Ферми в макромире.*

*Ключевые слова: физические эффекты, магнитные поля, электроны, измерение энергии Ферми, магнитопольные измерительные преобразователи.*

V.T. KONDRATOV

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Science of Ukraine

**FUNDAMENTAL METROLOGY: THE MAGNETIC-FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE  
THE PHENOMENON OF TRANSFER OF ENERGY AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR  
SUBSTANCE. Part 6. Measurement of energy level of Fermi and Fermi's energy  
under normal conditions carrying out of measurements**

*In paper the method of measurement of Fermi energy level and the method of measurement of Fermi energy of investigated samples of materials, their essence and distinctions is considered. The quantities equations used in the determination of these quantities are given. Some results of experimental researches are shown. Technical decisions of a number magnetic-fields of measurement of level and Fermi energy, possible variants of their perfection are described. For the first time in the world the attention to the question on distinction of concepts «Fermi's level» and «Fermi's energy» and their units of measurements in SI system is sharply brought. Necessity of development magnetic-fields methods of measurements of level and energy of Fermi does not raise the doubts in view of importance of the specified quantities at an estimation and comparison of quality of materials. Development of the given theory causes necessity of working out of standard documents and uniform requirements to normalized parameters, the form and manufacturing techniques of wave guides from samples of investigated materials. The essence of methods of measurement of Fermi's level and Fermi's energy is in detail described, their distinctions are shown. For the first time in the world the communication equations between the physical quantities measured at definition of power level of Fermi and energy of materials are resulted. The equations of measurements of Fermi energy level of and Fermi's energy of materials under normal conditions the carrying out of measurements considering not the private quantities of wave guides, and the sizes led to units of measurements in SI are offered. For the first time in the world technical decisions magnetic-fields measuring instruments of level and energy of Fermi protected by patents of Ukraine are developed, their work, differences and features of realization is described. The greatest interest represent magnetic-fields measuring instruments of level and Fermi's energy on microcontrollers or on microconverters. They provide the greatest level of automation of process of measurements and high accuracy of measurements. The resulted results of experimental researches confirm substantive provisions magnetic-fields theories of measurements and essence of the physical processes proceeding in a material at influence on its solenoidal pulse magnetic field of high frequency. The received results expand our representations about magnetic-fields methods and measuring apparatuses of level and Fermi's energy under normal conditions carrying out of these measurements. The paper is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying magnetic-fields methods and measuring instruments of level and energy of Fermi in a macrocosm.*

*Keywords: physical effects, magnetic fields, measurement, Fermi's level, Fermi's energy, magnetic-fields measuring instruments.*

**Введение.** Данная статья является дальнейшим развитием магнитопольной теории измерений (МПТИ), развиваемой в работах [1–16].

Анализ известных магнитопольных эффектов, используемых для определения энергии Ферми металлов, показал, что практически все известные методы исследований уровня Ферми и поверхности Ферми основаны на облучении металлических образцов электромагнитными волнами микроволнового диапазона и на использовании магнитопольных эффектов квантования энергии электронов, проявляющихся при воздействии на металлические образцы сильными магнитными полями и низкими температурами [9].

Среди семи описанных и используемых эффектов эффект Шубникова – де Гааза был первым широко используемым и экспериментально наблюдаемым проявлением диамагнитного квантования энергии электронов в твердом теле и, как следствие этого, — осциллирующей зависимости плотности состояний электронов на уровне Ферми от напряженности магнитного поля.

Общим недостатком известных методов измерений энергии Ферми является: использование образцов металлов малых размеров, необходимость создания магнитных полей с большим значением магнитной индукции, а также использование низких температур. Они не предназначены для исследований свойств слабо проводящих и непроводящих материалов [9].

Другим существенным недостатком существующих методов измерения энергии Ферми является отсутствие уравнений связи между физическими величинами, отсутствие метрологического обеспечения наблюдаемых эффектов, методов и средств измерений на их основе.

В основном приводится только качественная картина наблюдаемого эффекта, но не количественная. Создается впечатление, что физики, открывшие описанные выше магнитопольные эффекты, не дружили с метрологией и измерительной техникой.

Ниже изложена сущность магнитопольного метода измерения уровня и энергии Ферми, приводится ряд технических решений средств измерений.

Объектом исследований являются магнитопольные методы и средства измерений.

Предметом исследований является описание сущности, преимуществ и недостатков магнитопольного метода измерения (МП МИ) уровня и энергии Ферми и соответствующих схемотехнических решений магнитопольных измерителей (МПИ).

### **Результаты исследований**

#### **1. Энергетический уровень и энергия Ферми**

Многие физики полагают, что уровень Ферми и энергия Ферми — это одно и то же. Так, например, в [13, 14] имеет место запись «Ферми-энергия (уровень Ферми)», «Энергия (уровень) Ферми» и т.п. С метрологической точки зрения такое предположение является ошибочным. Уровень и энергия — это два разных понятия, имеющих разный физический смысл. В [15], например, справедливо утверждается, что «уровень Ферми — некоторый условный уровень, соответствующий энергии Ферми системы фермионов» (Уровень Ферми обозначим как  $E_{FL}$ , где индекс FL — от слов «Fermi Level» и будем называть его «энергетическим уровнем Ферми»). Фермион (ферми-частица) — частица или квазичастица с полуцелым спином: электрон, протон, нейтрон, кварк. Полагаем, что энергетический уровень Ферми должен определяться приведенным к единице площади материала (вещества), т.е. к  $1 \text{ м}^2$  в системе СИ, а энергия Ферми, к единице объема материала (вещества), т.е. к  $1 \text{ м}^3$ . Нами разработаны технические решения средств измерений энергетического уровня Ферми и энергии Ферми исследуемых материалов. Рассмотрим их работу без использования сложных математических выкладок.

Положение энергетического уровня является одной из основных характеристик состояния электронов (электронного газа) в твердом теле. Вероятность заполнения энергетических состояний электронами в квантовой теории определяется, как известно, функцией Ферми

$$F_x(E_{FL_x}) = 1 / \left( e^{(E_{FL_x} - E_{FL_0})/k_B T} + 1 \right), \quad (1)$$

где  $E_{FL_x}$  — энергетический уровень, вероятность заполнения которого определяется;  $E_{FL_0}$  — характеристический энергетический уровень, относительно которого кривая вероятности симметрична;  $T$  — абсолютная температура;  $k_B$  — постоянная Больцмана.

Из (1) следует, что при абсолютном нуле функция Ферми  $F_x(E_{FL_x})_{\text{при } E_{FL_x} = E_{FL_0}} = 1$  и  $F_x(E_{FL_x})_{\text{при } E_{FL_x} > E_{FL_0}} = 0$ , т.е. все состояния, лежащие ниже уровня Ферми, полностью заняты электронами, а выше него свободны. Другими словами, функция Ферми равна единице при  $\{E_{FL_x}\} = \{E_{FL_0}\}$ , т.е. при равенстве значений энергетического уровня Ферми и характеристического энергетического уровня. Однако, при  $\{E_{FL_x}\} > \{E_{FL_0}\}$ , функция Ферми равна нулю.

Энергетический уровень Ферми для электронов играет роль уровня химического потенциала для незаряженных частиц [15]. Соответствующий ей потенциал  $j_{FL_x} = E_{FL_x} / e$  называют электрохимическим потенциалом. Однако в работе [15] делается некорректный вывод о том, что «... уровнем Ферми или энергией Ферми в металлах является энергия, которую может иметь электрон при температуре абсолютного нуля». Если говорить о всех электронах в единице объема, тогда говорят уже об энергии материала или вещества. Сами авторы справедливо отмечают, что, в отличие от энергетического уровня Ферми, для электронного газа в металлах при температуре абсолютного нуля ( $\{T\} = 0$ ) значение энергии Ферми (обозначается как  $E_F$ ) однозначно определяется концентрацией электронов и ее можно выразить через число  $n$  частиц электронного газа в единице объема. Причем зависимость энергии Ферми  $E_F$  от концентрации электронов нелинейная.

**2. Измерение энергетического уровня и энергии Ферми при нормальных условиях проведения измерений.** Известно, что без действия внешнего электромагнитного поля электроны в веществе, вращающиеся по своим орбитам, движутся хаотично и перемещаются куда угодно — вдоль материала, поперек, по диагонали, по спирали и т.п. Поэтому сумма всех векторов скоростей электронов в любой момент времени равна нулю. При приложении внешнего магнитного поля к собственному вектору скорости добавляется составляющая, которая параллельна вектору распространения силовых линий напряженности магнитного поля. Поскольку данный вектор скорости добавляется к вектору скорости каждого электрона, то сумма векторов уже не равна нулю. Говорят, что электроны стали двигаться упорядоченно (как бы с

небольшим дрейфом вдоль линий поля). В этом случае электрон начинает двигаться как по своей орбите, так и вдоль магнитных силовых линий, то есть по спирали. Скорость движения электронов составляет единицы мм /сек.

Согласно принципу Паули, даже при  $T = 0$  электроны металла не покоятся, а движутся с разными энергиями. Максимальная энергия, которую имеют электроны, называется энергией Ферми.

Рассмотрим техническую задачу разработки метода измерения внутренней энергии Ферми материалов в предположении, что материал, из которого изготавливается волновод, имеет приповерхностный слой, содержащий заряженные квазичастицы. Другими словами, вначале соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты взаимодействует с заряженными частицами приповерхностного слоя материала, сметает его, а затем начинает взаимодействовать с электронами самого материала.

### 2.1. Магнитопольевые методы измерения и их особенности

В работе [9] проанализированы и описаны известные физические эффекты и методы измерения энергии Ферми, указаны недостатки в их реализации.

Рассмотрим магнитопольевые методы измерения энергетического уровня Ферми и внутренней энергии исследуемого образца материала (энергии Ферми) при нормальных условиях проведения измерений, прежде всего без использования сверхнизких температур.

Как было показано в работах [8–10, 12], магнитопольевые методы основаны на новом физическом принципе измерений — явлении переноса энергии и информации через материал в результате взаимодействия искусственно созданного соленоидального импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты с электронами исследуемого материала, из которого изготовлен волновод.

Волновод, как функциональный элемент, как источник энергии Ферми исследуемого материала, изготавливается в виде симметричной плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа, — плоского волновода или резонатора (рис. 1), выполненного в виде двух плоских одновитковых или многовитковых спиральных катушек индуктивности, соединенных между собой параллельно (рис. 1, а) или последовательно (рис. 1, б), без и с пространственным инвертированием одного из контуров (рис. 1, а, д).

Такая конфигурация обеспечивает выполнение закона сохранения механической энергии движущихся электронов. В волноводах в качестве исследуемого материала может быть использована листовая медь, листовая алюминий, свинец, полипропилен, текстолит или любой другого листовой материал. В резонаторах используются преимущественно медный или серебряный провода.

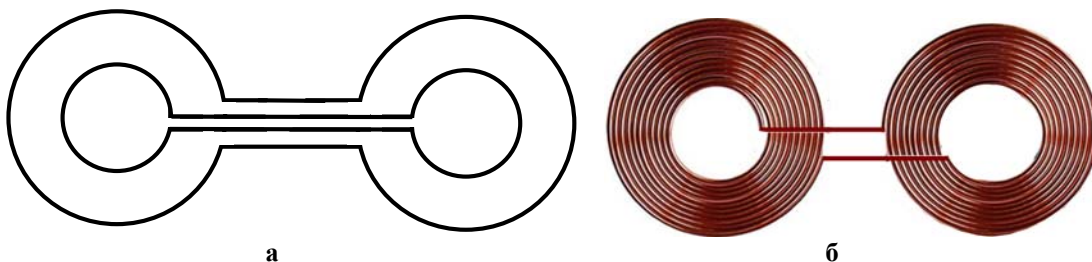
При необходимости включения измерителя тока, в волноводе делается разрыв замкнутого контура по центру симметрии и устанавливаются токопроводящие контакты, как показано на рис. 1, в, е. В резонаторе выводами служат сами провода катушек индуктивности (рис. 1, г).

Оба контура волновода образуют замкнутую двухконтурную механическую систему. В общем случае измерения энергии Ферми как металлов, так и диэлектриков, частота собственного резонанса двухконтурной системы может не совпадать с частотой сигнала (сверх)высокой частоты. В этом случае используются волноводы, а не резонаторы. В случаях измерения энергии Ферми только металлов, может быть использованы волноводы-резонаторы, настроенные на определенные частоты. Ниже будем говорить только о волноводах.

Для получения достоверных результатов измерений волновод изготавливается из исследуемого материала с нормированными по размерам толщиной  $h_{B0}$  и площадью поверхности  $s_{B0}$ , например,  $h_{B0} = 1 \text{ мм}^2$ , а  $s_{B0} = 1000 \text{ мм}^2$ . В этом случае объем волновода составит  $v_{B0} = 1000 \text{ мм}^3$ , что, позволяет достаточно легко вычислить энергетический уровень Ферми и энергию Ферми материала, приведенные к единице площади и объема волновода.

Обеспечение единства измерений возможно только в том случае, если будут выработаны нормативные требования и документы по изготовлению волноводов с заданными параметрами из образцов исследуемых материалов, а также разработаны методики определения значений энергии и уровня Ферми при нормальных условиях проведения измерений. На сегодняшний день это главная задача МОЗМ.

Для реализации магнитопольевого метода измерения формируется две пары идентичных по параметрам высокочастотных входных и выходных параллельных колебательных контуров  $L_1, L_2$  и  $L_3, L_4$  (см. рис. 2, а, б).



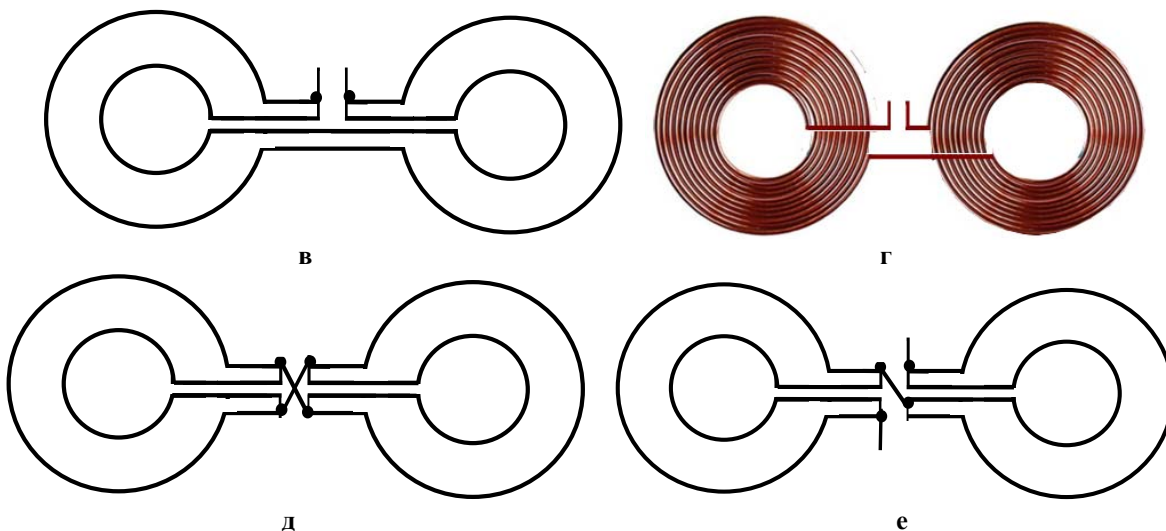


Рис. 1. Варианты плоских волноводов (резонаторов)

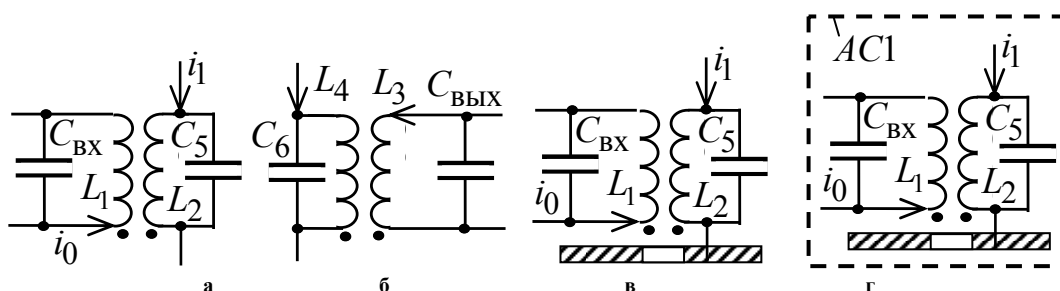


Рис. 2. Графическое изображение расположения колебательных контуров

Первая пара идентичных по значениям параметров входных и выходных колебательных контуров  $L_1C_{\text{ВХ}}$  и  $L_2C_5$  первой катушки индуктивности располагается над первым контуром волновода (рис. 2, в), а вторая пара идентичных входных и выходных колебательных контуров  $L_3C_{\text{ВЫХ}}$  и  $L_4C_6$  второй катушки индуктивности располагается над вторым контуром волновода. На приведенных в статье схемах магнитолевых измерителей конденсаторы  $C_{\text{ВХ}}$  и  $C_{\text{ВЫХ}}$  не показаны.

Катушки индуктивности с парами колебательных контуров располагаются в пространстве таким образом, чтобы их оси и центральные силовые линии магнитного поля высокой частоты были направлены перпендикулярно площади поверхности волновода (см. рис. 2, в, г).

С целью защиты колебательных контуров и волновода от воздействия внешних магнитных полей, первая и вторая катушки индуктивности вместе с первым и вторым плоскими контурами волновода размещаются внутри броневого ферритовых сердечников с априори заданной магнитной проницаемостью и частотной характеристикой. На рис. 2, г броневого ферритовый сердечник  $AC1$  изображен в виде пунктирной линии. Один из вариантов внешнего вида системы экранированных контуров (многоконтурной электромеханической системы) показан на рис. 3, а. На рис. 3, б приведено графическое изображение плоского двухконтурного волновода, где стрелками условно показано движение электронов в материале волновода.

Расстояние  $l_1$  между центрами  $O_{\text{Д}}, O_{\text{П}}$  катушек индуктивности (центрами броневого ферритовых сердечников) и габаритный размер (длина) волновода  $l_2$  выбираются с учетом размеров броневого ферритовых сердечников и межцентрового расстояния,

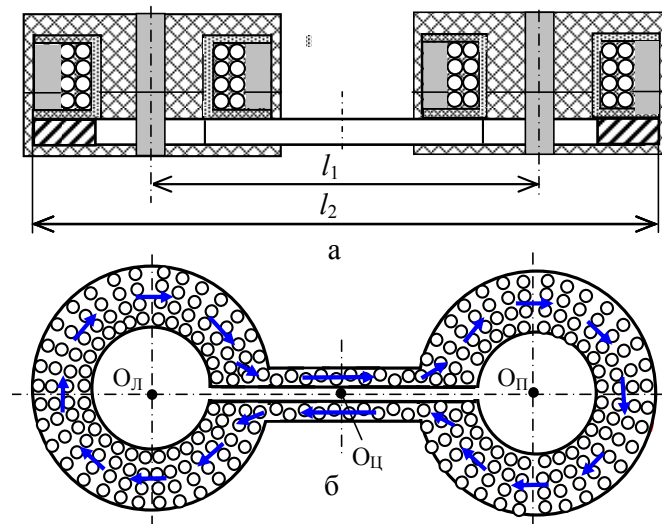


Рис. 3. Графическое изображение: а) многоконтурной электромеханической системы; б) потока отрицательно заряженных частиц, движущихся по замкнутому контуру плоской двухконтурной механической системы замкнутого типа

Сущность метода заключается в следующем. Вначале одним из известных методов измеряется или вычисляется, например по чертежам, площадь поверхности  $S_x$  волновода и средняя длина  $l_x$  замкнутого контура волновода, сквозь материал которого движутся электроны (см. рис. 3, б, пунктирная кривая). Резистор и конденсатор  $RC$ -нагрузки выбираются с априори заданными с высокой точностью значениями. Это необходимо для установления требуемого значения постоянной времени  $RC$ -нагрузки. Измерение и выбор указанных величин необходимо для вычисления значения искомой физической величины — уровня энергии Ферми.

Затем генерируется ток прямоугольной формы (типа меандр), —

$$i_1(t) = I_m \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \quad (1)$$

где  $k_1 = 1, k_2 = 2$ ;  $I_m$  — амплитуда тока, высокой или сверхвысокой и стабильной частоты  $\omega_0$  с нормированной по значению амплитудой  $I_m$ .

Импульсы тока (1) высокой частоты пропускаются через катушку индуктивности  $L_2$  входного колебательного контура  $L_2 C_5$  первой пары колебательных контуров (рис. 2, а, в, г). Часть сигнала, например, 1% – 5 (10)% от среднего значения тока, наведенного в контуре  $L_1 C_{вх}$ , направляется во встречном направлении по отношению к направлению течения тока в колебательном контуре  $L_2 C_5$  (рис. 2, а). Это осуществляется за счет выпрямления с помощью диода высокочастотного напряжения, наведенного во входном контуре  $L_1 C_{вх}$  (рис. 2, а). Известно, что если токи в проводниках текут в разных направлениях, то на проводники действует сила, которая притягивает их друг к другу. Тем самым обеспечиваются дополнительные емкостные и взаимно индуктивные связи между колебательными контурами в зависимости от силы тока  $i_0$ . Сила тока  $i_0$  устанавливается в пределах нескольких микроампер.

Во второй паре колебательных контуров  $L_4 C_6$  и  $L_3 C_{вых}$  в катушках индуктивности токи текут в одном и том же направлении — сверху вниз (рис. 2, б).

«Горячие» концы катушек индуктивности (см. рис. 2 — звездочки у нижней части катушки) двух пар входных и выходных колебательных контуров располагаются со стороны поверхности исследуемого материала — источника энергии Ферми, как показано на рис. 2, в, г и тем самым обеспечивается индуктивная и емкостная связи с поверхностью контуров волновода. Следует отметить, что катушки индуктивности колебательных контуров рекомендуется изготавливать равными по значению индуктивности, т.е.  $\{L_1\} = \{L_2\} = \{L_3\} = \{L_4\} = \{L_0\}$ .

Для управления током высокой частоты в части формирования пачек импульсов, генерируется сигнал низкой частоты коммутации

$$u_1(t) = U_0 \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_k t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (2)$$

где  $k_1 = 1, k_2 = 2$ ;  $U_0$  — максимальное значение сигнала частоты коммутации, — при математическом описании нечетных полупериодов сигнала, и

$$u_2(t) = U_0 \left[ \frac{k_1}{k_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (3)$$

— при описания четных полупериодов сигнала.

Синхронизация сигналов (2) и (3) низкой частоты высокочастотным сигналом (1) достигается за счет обеспечения кратности частот, т.е. при  $\Omega_K = \omega_0 / n$ , где  $n$  — целое число, например,  $n = 1000 \dots 5000$ .

В нечетные полупериоды низкой частоты коммутации ток

$$i_2(t) = I_{m2} \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \left[ \frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (4)$$

где  $I_{m2}$  — амплитудное значение тока, протекающий через второй колебательный контур  $L_2 C_5$ , формирует в катушке индуктивности соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты с энергией

$$E_{M1} = L_2 [i_2(t)]^2 / k_2, \quad (5)$$

где  $L_2$  — индуктивность выходного колебательного контура первой пары высокочастотных контуров.

Силовые линии импульсного магнитного поля в нечетные полупериоды сигнала (2) низкой частоты коммутации воздействуют, поочередно, на электроны первого плоского контура волновода. В четные полупериоды сигнала (3) низкой частоты коммутации импульсное соленоидальное магнитное поле высокой частоты на электроны волновода не воздействуют. В четные полупериоды электроны возвращаются в исходные состояния.

Периодическое силовое воздействие импульсного магнитного поля на электроны материала волновода приводит к их сложному колебательно-вращательно-поступательному движению и возникновению в материале волновода токов смещения и токов проводимости (в металлах) или токов смещения и токов переноса (в диэлектриках). Токи смещения возникают за счет смещения всей совокупности связанных электронов первого контура волновода относительно некоторого их “среднего” положения по глубине расположения в слое материала. По-нашему мнению, связанные электроны образуют (дышащую) стоячую волну сложной формы поперёк поверхности исследуемого материала. Ее минимумы и максимумы формируются периодически, с низкой частотой коммутации. Период возникновения стоячей волны равен периоду частоты коммутации  $T_K = k_2 \pi / \Omega_K$ , где  $k_2 = 2$ .

Токи проводимости и токи переноса обусловлены сложным (колебательно-вращательно-поступательным) движением электронов по замкнутому контуру волновода. Их движение условно показано стрелками на рис. 3, б.

За счет высокочастотных колебаний свободных электронов возникает продольная высокочастотная электромагнитная волна, которая переносит энергию электронов по замкнутому контуру волновода. Это осуществляется благодаря силовому воздействию на свободные электроны импульсного соленоидального магнитного поля высокой частоты, сил Кулона и сил Лоренца.

Фактически в волноводе формируются поперечная и продольная электромагнитные волны, несущие энергию электронов. Свободные электроны оббегают поверхность стоячей волны.

В целом, электромагнитное поле, создаваемое движущимися электронами, наводит во входном колебательном контуре  $L_4 C_6$  второй пары колебательных контуров электродвижущую силу (ЭДС)  $u_{FL}(t)$  высокой частоты, которая, при идентичных контурах, равна или пропорциональна значению энергетического уровня Ферми, полученному при нормальных условиях проведения измерений, в частности, при температуре окружающей среды равной, например,  $20^\circ \text{C}$ .

Полученный сигнал  $u_F(t)$  трансформируется в выходной колебательный контур  $L_3 C_{\text{вых}}$  с априори заданным коэффициентом трансформации  $k_T$ .

Выходной сигнал пассивного колебательного контура  $L_3 C_{\text{вых}}$ , индуктивно связанный с контуром  $L_4 C_6$ , математически описывается следующим образом:

$$u'_{FL}(t) = k_T u_{FL}(t). \quad (6)$$

Затем напряжение (6) выпрямляется и усредняется согласно аналитическому выражению:

$$U_x = \sqrt{\frac{R_H}{T'_K}} \int_0^{T'_K} |i_{k2}(t)| dt = \sqrt{\frac{k_1}{T'_K}} \int_0^{T'_K} |u'_{FL}(t)| dt = k_T S_{\text{п1}} E_{FL}, \quad (7)$$

где  $T'_K = n T_K$  — время интегрирования, кратное периоду частоты коммутации ( $n = 1-100$  и более);  $R_H$  — сопротивление нагрузки выходного колебательного контура  $L_3 C_{\text{вых}}$  второй пары колебательных контуров;  $i_{k2}(t)$  — ток в колебательном контуре  $L_3 C_{\text{вых}}$ ;  $S_{\text{п1}}$  — крутизна преобразования энергии Ферми в напряжение.

Следует отметить, что усреднение напряжения обеспечивается за счет использования  $RC$ -нагрузки,

осуществляющей усреднение высокочастотных колебаний при априори заданном значении постоянной времени. Напряжение (7) измеряется и запоминается. По результатам измерений полученного напряжения и площади поверхности материала волновода вычисляется значение энергетического уровня Ферми, приведенное к единице площади исследуемого материала.

Действующее значение энергетического уровня Ферми исследуемого образца материала, приведенное, согласно СИ, к единице пути (к 1 м) и к единице площади (к 1 м<sup>2</sup>), определяется, при нормальных условиях выполнение измерений, согласно уравнению величин

$$E_{FL} = s_{\text{пр}} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \frac{l_0}{l_x} \text{эВ} = s_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{S_0}{S_x} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ} = s'_{\text{пр}} \frac{U_x^2 t_x}{R_H} \text{эВ}, \quad (8)$$

где  $E_{FL}$  — энергетический уровень Ферми ( $FL$  – Fermi Level)  $s_{\text{пр}}$  — крутизна преобразования, эВ/Дж;  $l_x$  — средняя длина замкнутого контура волновода по которому движутся электроны, м;  $l_0$  — нормированная по значению длина контура волновода, равная 1 м;  $S_0$  — нормированная по значению площадь поверхности материала волновода, на который действует магнитное поле, 1 м<sup>2</sup>;  $S_x$  — реальная площадь исследуемого материала волновода, м<sup>2</sup>;  $t_x = n\tau_0$  — время усреднения;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\tau_0$  — постоянная времени интегрирования ( $\tau_0 = 1$  с);  $U_x = U_{\text{хсв}}$ ;  $R_H$  — сопротивление  $RC$ -нагрузки;  $s'_{\text{пр}} = s_{\text{пр}} / l_x S_x$  эВ/Дж при  $l_0 = 1$  м,  $S_0 = 1$  м<sup>2</sup>.

Такова сущность магнитополевого метода измерения энергетического уровня Ферми.

Метод измерения энергии Ферми материалов аналогичный описанному, но имеет свои отличительные особенности. Во-первых, для определения конечного результата, дополнительно измеряется объем  $V_x$  волновода в м<sup>3</sup>. Во-вторых, что очень важно, измеряется действующее значение  $I_{\text{вч}}$  высокочастотного тока, протекающего по замкнутому контуру внутри материала волновода. Это достигается путем разрыва цепи указанного контура (рис. 1, в, г, е) и включением в этот разрыв соответствующего измерителя тока, реализующего, например, метод токового трансформатора, термоэлектрический метод измерения и другие. В-третьих, действующее значение энергии Ферми материала определяется при нормальных условиях выполнения измерений при приведенных, согласно СИ, к единице измерения не только средней длины пути электронов, которые движутся по замкнутому контуру волновода (в метрах), но и к единице объема материала волновода (в метрах кубических) по уравнению величин

$$E_F = S_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{V_0}{V_x} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ} = S_{\text{пр}} \frac{l_0}{l_x} \frac{V_0}{V_x} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ} = S''_{\text{пр}} U_x I_{\text{вч}} t_x \text{эВ}, \quad (9)$$

где  $S''_{\text{пр}}$  — крутизна преобразования, Дж;  $S''_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} / l_x V_x$ , Дж, при  $l_0 = 1$  м и  $V_0 = 1$  м<sup>3</sup>.

Описанные методы являются пионерскими и не имеют аналогов. Они открыли новую страничку в истории измерений и обеспечили возможность фундаментальных исследований энергетических свойств любых материалов.

Особенностями описанных магнитолевых методов измерений является формирование стабильного и нормированного по значению амплитуды, частоты и скважности тока прямоугольной формы (типа меандр). Такой ток обеспечивает формирование соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты. Его действие на электроны исследуемого материала приводит к их сложному движению по замкнутому контуру волновода. Возникающая высокочастотная электромагнитная волна осуществляет бесконечно длительный групповой перенос энергии электронов по замкнутому контуру, — до прекращения действия магнитного поля.

Повышенная точность и чувствительность магнитолевых измерений обеспечивается за счет высокого качества изготовления волноводов и высокочастотных колебательных контуров, генерирования сигналов высокой (например,  $10 \cdot 10^6$  Гц) и стабильной частоты с нормированной по значению амплитудой (например, 2 В), за счет формирования, как правило, синфазного сигнала низкой частоты коммутации ( $1 \cdot 10^3$  Гц) со скважностью два путем деления высокой частоты в заданное число раз, например, в 10000 раз, то есть  $10 \text{ МГц} / 10000 = 1 \text{ кГц}$ , а также за счет использования измерительных приборов высокого класса точности.

### 3. Технические решения магнитолевых измерителей энергетического уровня Ферми и энергии Ферми. 3.1. Магнитолевой измеритель уровня Ферми

На рис. 4 приведен один из простых вариантов реализации метода измерения энергетических уровней Ферми. На приведенной схеме устройства для измерения энергетического уровня Ферми используются следующие обозначения: ИП — источник питания; ЦВ — цифровой вольтметр; МГ — микрометрическая головка; ГЧК — генератор частоты коммутации;  $VT 1$  и  $VT 2$  — первый и второй транзисторы;  $ZQ$  — кварцевый резонатор с металлическими накладками;  $R1, R2, R3, R4$  и  $R5$  — первый,

второй, третий и четвертый резисторы;  $C1, C2, C3, C4, C5$  и  $C6$  — первый, второй, третий, четвертый пятый и шестой конденсаторы;  $VD1$  и  $VD2$  - первый и второй диоды;  $L1$  и  $L2$  — первая и вторая катушки индуктивности первой пары идентичных колебательных контуров;  $L3$  и  $L4$  — первая и вторая катушки индуктивности второй пары идентичных колебательных контуров;  $WG$  — источник энергии Ферми, выполненный из плоского исследуемого материала в форме восьмерки;  $AC1$  и  $AC2$  — первый и второй бронированные ферритовые сердечники;  $Kn$  — двойная кнопка «сброс показаний»; ЦМ — цифровой микроамперметр.

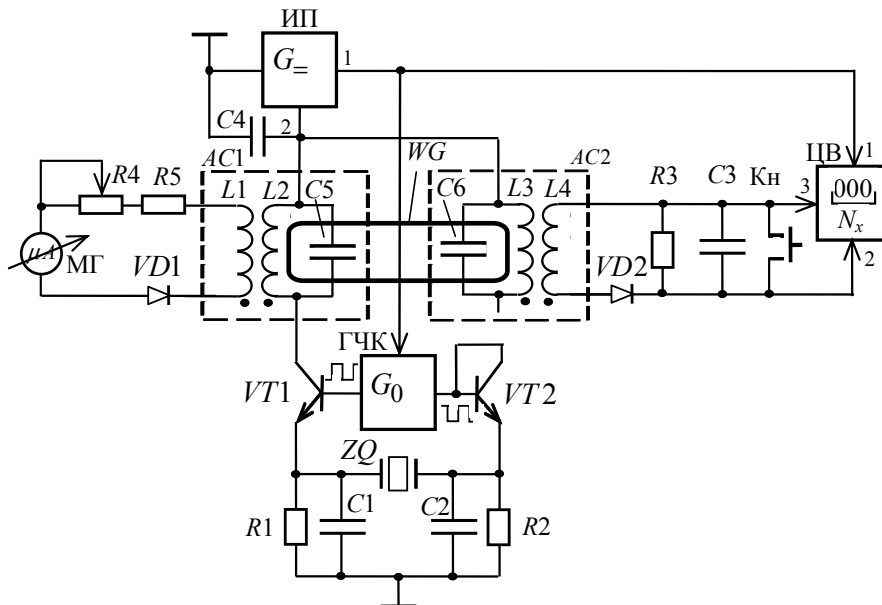


Рис. 4. Структурно-функциональная схема устройства для измерения энергетического уровня Ферми

Стабильность частоты тока обеспечивается за счет использования кварцованного генератора импульсов, выполненного на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , кварцевом резонаторе  $ZQ$ , резисторах  $R1$  и  $R2$  и генераторе низкой частоты коммутации ГЧК. Причем, коллектор первого транзистора  $VT$  нагружен на катушку индуктивности  $L2$ . Коллектор второго транзистора  $VT$  может быть нагружен на катушку индуктивности  $L3$  (при двухтактном режиме работы устройства) или соединен с его базой (— диодное включение), как показано на рис. 4 (при однотактном режиме работы).

Для стабилизации амплитуды тока в устройстве используется отрицательная обратная связь по току, формирующему магнитный поток. Для этого первая катушки индуктивности  $L1$ , индуктивно связанная с катушкой  $L2$  первой пары идентичных колебательных контуров, нагружается на цепочку последовательно включенных между собой токоограничивающего резистора  $R1$ , подстроечного резистора  $R2$ , микрометрическую головку МГ и диод  $VD1$ . ЭДС, наведенная в катушке индуктивности  $L1$ , выпрямляется диодом  $VD1$  таким образом, чтобы направление тока в ней было противоположным направлению тока через катушку индуктивности  $L2$ . Ток обратной связи устанавливается в пределах 0,1% — 5 (10)% от максимального значения тока, протекающего через катушку индуктивности  $L2$ . Установка тока обратной связи осуществляется путем подбора значений переменного резистора  $R4$  и токоограничивающего резистора  $R5$ . Действительное значение тока отображается на шкале микрометрической головки МГ. Таким образом устанавливается отрицательная обратная связь по магнитному потоку.

Постоянная времени  $RC$ -нагрузки (резистор  $R3$  и конденсатор  $C3$ ) выпрямителя (диод  $VD2$ ) устанавливается равной 1 с, т.е.  $t_x = 1$  с.

Сброс показаний цифрового вольтметра ЦВ осуществляется с помощью кнопки  $Kn$ , включенной параллельно конденсатору  $C3$   $RC$ -нагрузки.

По результатам измерений осуществляется расчет энергетического уровня Ферми согласно уравнению числовых значений (при  $l_0 = 1$  м,  $S_0 = 1$  м<sup>2</sup>)

$$E_{FL} = \{s_{пр}\} \frac{\{I_0\} \{S_0\} \{U_x\}^2 \{t_x\}}{\{I_x\} \{S_x\} \{R_H\}} = \frac{\{s_{пр}\}}{\{I_x\} \{S_x\}} \cdot \frac{\{U_x\}^2 \cdot \{t_x\}}{R_H} = \{s'_{пр}\} \left[ \frac{\text{эВ}}{\text{Дж}} \right] \cdot \frac{\{U_x\} \{t_x\}}{\{R_H\}} [\text{Дж}] = \{s'_{пр}\} \frac{\{U_x\}^2 \{t_x\}}{\{R_H\}} \text{эВ} \quad (10)$$

при нормальных условиях проведения измерений.

### 3.2. Магнитопольевой измеритель энергетического уровня Ферми

Процесс измерений с помощью устройства, структурно-функциональная схема которого приведена



на рис. 4, можно автоматизировать, если дополнительно ввести цифровой измеритель тока ЦИТ, управляемый цифровой секундомер, арифметико-логическое устройство АЛУ и цифровое отсчетное устройство ЦОУ. В этом случае структурно-функциональная схема устройства примет вид [12], приведенный на рис. 5.

Данное техническое решение магнитополевого измерителя энергетического уровня Ферми было разработано в связи с предположением, что на поверхности волновода существует приповерхностный слой из заряженных частиц.

Как показано в работе [16], в металлах свободные электроны начинают хаотически перемещаться в межатомном пространстве, соударяясь с электронными оболочками атомов и обмениваясь с ними энергией. Этим объясняется хорошая теплопроводность металлов. Часть свободных электронов выходит на поверхность металла, создавая приповерхностный слой. В приповерхностном слое электроны могут объединяться и создавать цепочки или целую поверхность, названую В.А. Ацюковским «поверхностью Ферми». Расположение электронов оказывается устойчивым: каждый «держится» за своих соседей, они как кольчугой закрывают поверхность металла (рис. 5). При этом сумма электрических и магнитных полей стремится к нулю, и поверхность металла в целом не будет иметь ни электрического заряда, ни магнитного поля. Такое представление о приповерхностном слое металлов является новым и представляет научный интерес и для метрологов.

Рассмотрим работу магнитополевого измерителя, приведенного на рис. 6, для случая, когда используются уравнения измерений без приведения результатов измерений к единице площади и объема материала волновода.

В этом случае процесс измерений следует разделить на два этапа: 1) измерение времени ( $\tau_x$  и  $4,6\tau_x$ ) и скорости ( $v_x$ ) переходного процесса с момента времени воздействия импульсного магнитного поля на исследуемый материал, до перевода его в новое состояние за заданный промежуток времени  $t_{x1} \leq T_k$ , меньший периода сигнала частоты коммутации, например, за 1–100 мкс; 2) — измерение и вычисление энергетического уровня Ферми исследуемого материала, из которого выполнен волновод.

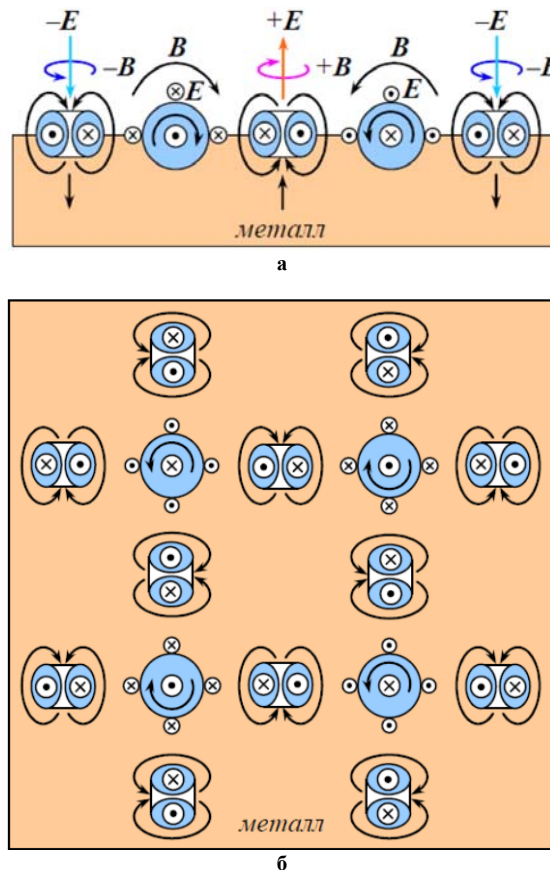


Рис. 5. Электроны на поверхности металла: а) вид в разрезе, б) вид сверху

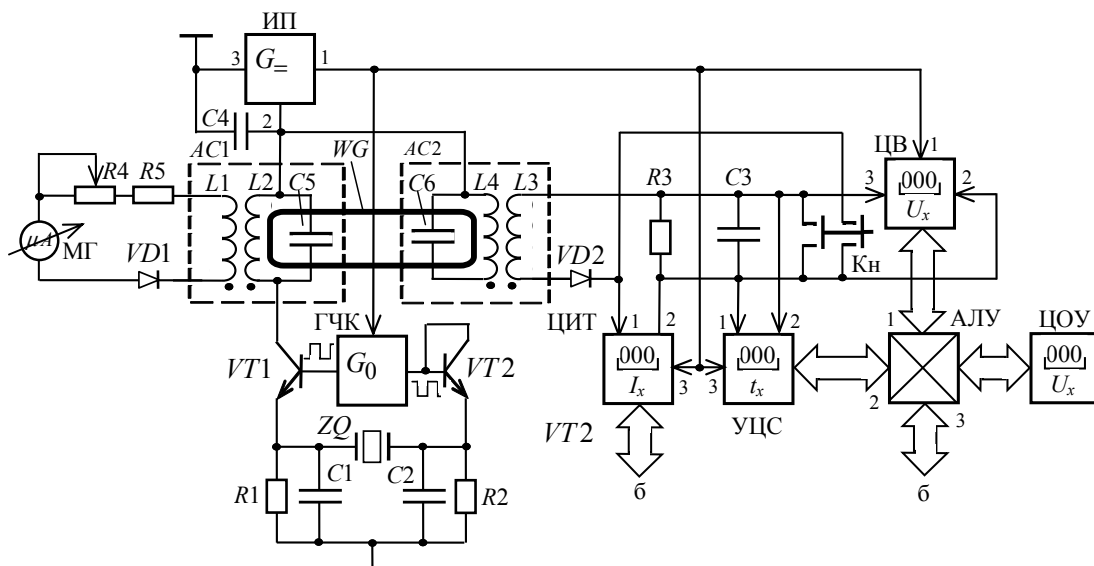


Рис. 6. Структурно-функциональная схема автоматизированного устройства для измерения энергетического уровня Ферми

Измерение времени и скорости переходного процесса является важной характеристикой свойств материала, поскольку по ним можно оценить энергию частиц приповерхностного слоя материала, время и скорость ее изменения (компенсации).

За счет емкостной связи катушек  $L2$  и  $L4$  через волновод  $WG$  и их непосредственной гальванической связи через второй вывод источник питания ИП, в катушке индуктивности  $L4$  генерируется ЭДС в виде высокочастотного напряжения той же частоты, пропорциональное энергетическому уровню Ферми. Это высокочастотное напряжение трансформируется на выход катушки индуктивности  $L3$  с заданным коэффициентом трансформации  $k_T$ .

Сигнал  $u'_{FL}(t)$  на выходе второй катушки индуктивности  $L3$  описывается уравнением величин (6). Полученное переменное напряжение выпрямляется, усредняется благодаря  $RC$ -нагрузки и измеряется с помощью цифрового вольтметра ЦВ. Полученное значение напряжения  $U_{cp}$  (7) запоминается и в виде соответствующего кода числа поступает в АЛУ. Одновременно измеряются токи  $i_{x1}$  и  $i_{x2}$  и соответствующие падения напряжений  $u_{x1}$  и  $u_{x2}$  на  $RC$ -нагрузке (см. рис. 6,  $R3$  и  $C3$ ) в фиксированный моменты времени  $t_{x1}$  ( $t_{x1} = \Delta t_0 \leq T_k$ ) и в момент времени  $t_{x2}$  ( $t_{x1} > T'_k$ ). В указанные моменты времени на отсчетном устройстве ЦВ появляются, соответственно, первое значения постоянного напряжения  $U_{x1}$ , пропорционального энергии приповерхностного слоя заряженных частиц, и второе, конечное, значение средневыпрямленного напряжения  $U_{x2}$ . Причем напряжение  $U_{x2}$  фиксируется в момент времени, при котором заряд (или напряжение), накопленный конденсатором  $C3$ , достигнет максимального значения, при котором значение напряжения на нем будет отличаться от предыдущего значения с априори заданной погрешностью  $\delta_0$ , т.е.  $\Delta U_x = U_{x2}'' - U_{x2} \leq \delta_0$ . Измеренные значения времени  $t_{x1}$  и  $t_{x2}$ , токов  $I_{x1}$  и  $I_{x2}$  и напряжений  $U_{x1}$  (при  $t_{x1} \leq T_k$ ) и  $U_{x2}$  (при  $t_{x1} > T'_k$  и  $\Delta U_0 \leq \delta_0$ ) запоминаются и в определенные моменты времени поступают в АЛУ.

Результаты измерений токов, напряжений и интервалов времени поступают на цифровые входы арифметико-логического устройства АЛУ. По определенной программе, с помощью АЛУ осуществляется вычисление указанных энергий.

Значение энергетического уровня приповерхностного слоя заряженных частиц вычисляется по уравнению измерений

$$E_{nc} = s_0 U_{x1} I_{x1} t_{x1} = s_0 t_{x1} U_{x1}^2 / R_n \text{ эВ}, \tag{11}$$

где  $s_0 = 1 \text{ эВ} / 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \cong 0,624 \cdot 10^{19} \text{ эВ/Дж}$  — крутизна преобразования.

Значение суммарной энергии материала волновода и его приповерхностного слоя определяется по уравнению измерений

$$E_{\Sigma} = s_0 U_{x2} I_{x2} t_{x2} = s_0 t_{x2} U_{x2}^2 / R_n \text{ эВ}, \tag{12}$$

Значение энергетического уровня Ферми исследуемого материала определяется по уравнению измерений

$$E_{FL} = s_0 (U_{x2} I_{x2} t_{x2} - U_{x1} I_{x1} t_{x1}) = s_0 (U_{x2}^2 t_{x2} - U_{x1}^2 t_{x1}) / R_n \text{ эВ}. \tag{13}$$

Полученные результаты отображаются на экране цифрового отсчетного устройства ЦОУ.

Для проведения повторных измерений используется кнопка Кн «сброс» показаний. При ее нажатии

разряжается конденсатор С3 и замыкаются входы цифрового измерителя тока ЦИТ (см. рис. 6). Поскольку  $\{t_{x1}\} \ll \{t_{x2}\}$ , то на практике значением энергетического уровня (11) приповерхностного слоя заряженных частиц пренебрегают.

Таким образом, описан процесс измерений и приведены соответствующие уравнения величин для случая, когда результаты измерений, при нормальных условиях выполнения измерений, характеризуют только тот материал волновода, который используется в устройстве, — без общения и без приведения результатов измерений к единице площади и объема материала волновода.

**3.3. Магнитополовой измеритель уровня и энергии Ферми.** Ниже, на рис. 7, приведена структурно-функциональная схема магнитополового измерителя как энергетического уровня Ферми, так и энергии Ферми. Отличие ее от структурно-функциональной схемы, приведенной на рис. 4, состоит в том, что, как было сказано выше, для измерения энергии Ферми материалов в устройстве дополнительно введен измеритель действующего значения высокочастотного тока, обусловленного сложным (колебательно-вращательно-поступательным) движением электронов по замкнутому контуру волновода. Второе отличие состоит в исключении конденсаторов С5 и С6, т.е. в использовании только собственных емкостей контуров. Это позволяет повысить чувствительность измерений и изменять частоту тока в широком диапазоне значений.

По результатам измерения действующего значения высокочастотного тока ( $I_{вч}$ ) значение энергии Ферми определяется по уравнению величин (9) или по уравнению числовых значений (при  $l_0 = 1\text{ м}$ ,  $V_0 = 1\text{ м}^3$  и  $t_x = 1\text{ с}$ ):

$$E_F = \{s_{пр}\} \frac{\{I_0\} \{V_0\}}{\{I_x\} \{V_x\}} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} = \frac{\{s'_{пр}\}}{\{I_x\} \{V_x\}} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} = \{s''_{пр}\} \{U_x\} \{I_{вч}\} \{t_x\} \text{ Дж} . \quad (14)$$

где  $\{S''_{пр}\}$  — числовое значение крутизны преобразования;  $\{S'_{пр}\} = \{S_{пр}\} / \{I_x\} \{V_x\}$  при  $l_0 = 1\text{ м}$  и  $V_0 = 1\text{ м}^3$ .

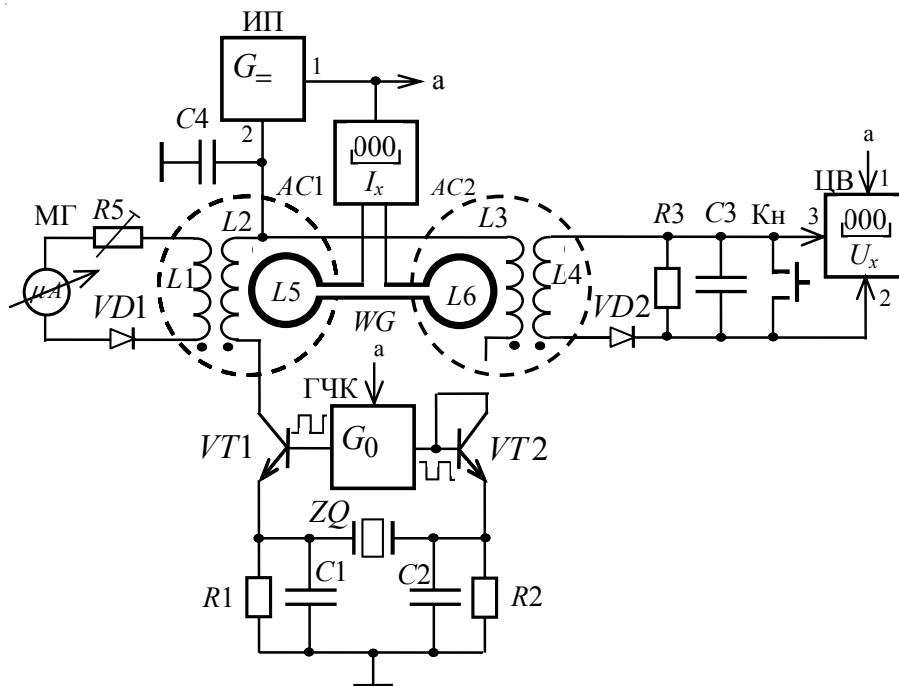


Рис. 7. Структурно-функциональная схема магнитополового измерителя уровня и энергии Ферми

Определение действующего значения энергетического уровня Ферми осуществляется согласно уравнению числовых значений (8).

В табл. 1 приведены результаты измерений параметров волновода, изготовленного из разных материалов, времени усреднения выходного напряжения и самого напряжения.

Зависимость выходного напряжения магнитополового измерителя от типа материала приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, уровни выходных напряжений для металлов и диэлектриков (см., например, пару материалов «медь – пропилен»), существенно различаются между собой. Исследования показали, что и толщина материала, из которого выполнен волновод, также влияет на результат измерений. Некоторую аномалию в результат измерений вносит двухсторонний стеклотекстолит фольгированный. Можно сделать вывод, что соленоидальное импульсное магнитное поле приводит в движение и воздействует на электроны

как медной фольги, так и стеклотекстолита, обуславливая суммарный эффект по выходному напряжению.

Таблица 1

**Результаты измерений параметров волновода, изготовленного из разных материалов, времени усреднения выходного напряжения и самого напряжения**

Результаты измерений								
№ п/п	Материал*	Параметры						
		Толщина $h_{вх}$ , мм	Площадь $S_x$ , мм <sup>2</sup>	Объем, $V_x$ , мм <sup>3</sup>	Длина пути $l_x$ , мм	Сопротивление $R_n$ , Ом	Время усреднения, $t_x$ , с	Напряжение $U_x$ , В
1	Медь, образец 1	2,5	750	1875	138	$10^4$	1	0,98
2	Медь, образец 2	0,5	750	375	138	$10^4$	1	0,9
3	Алюминий	0,7	750	525	138	$10^4$	1	0,96
4	Свинец	2,5	750	1875	138	$10^4$	1	0,65
5	Стеклотекстолит фольгированный двухсторонний	0,2	750	150	138	$10^4$	1	0,64
6	Полипропилен	2,1	750	1725	138	$10^4$	1	0,4

При измерениях особую роль играют переходные процессы, несущие полезную информацию об индивидуальных свойствах исследуемом материале. Как видно из приведенных графиков (см. рис. 8), для каждого образца исследуемого материала присущи свои параметры переходных процессов, изучение которых является самостоятельной научно-технической задачей. Только по истечении 5-и ... 20-и секунд показания прибора

До указанных моментов времени происходит, по-нашему мнению, процесс «очистения» материала от приповерхностного слоя заряженных частиц и процесс достижения электронами стационарности непрерывного движения по замкнутому контуру волновода. Показания ЦВ устанавливаются и не изменяются в течение всего времени наблюдений процесса измерений (см. рис. 8).

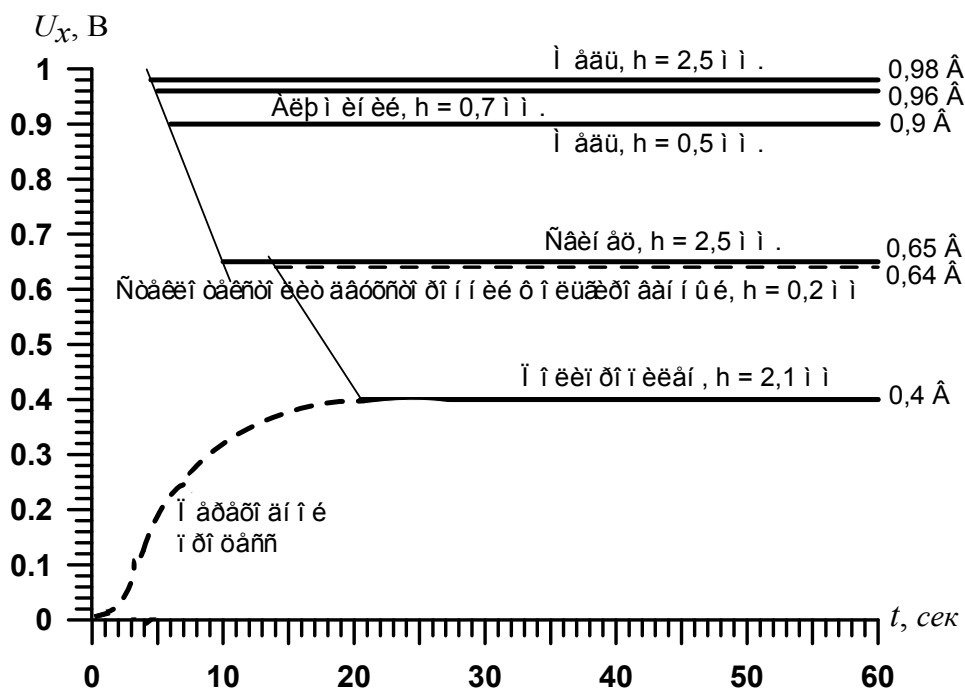


Рис. 8. Зависимость уровня выходного напряжения от типа материала и его толщины

В табл. 2 приведены результаты расчетов энергетического уровня Ферми для ряда материалов при выбранной линейной модели (8) и  $\{s'_{пр}\} = 6$ . Приведенные данные являются оценочными, поскольку, как было отмечено выше, еще не разработана методика калибровки магнитопольных измерителей и измерительных преобразователей, а также отсутствует методика изготовления волноводов с заданными параметрами. Расчеты энергии Ферми не приводятся ввиду отсутствия результатов измерения тока  $I_{вч}$ , значения крутизны преобразования  $s''_{пр}$  и методики калибровки. На решения этих задач и будут направлены усилия ученых и разработчиков магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми.

Таблица 2

**Результаты расчетов энергетического уровня Ферми для ряда материалов при выбранной линейной модели**

Результаты вычислений уровней и энергий при линейной модели				
№ п/п	Параметры	Напряжение $U_x$ , В	Энергетический уровень Ферми $E_{FL}$ , эВ (при $l_0=1\text{м}$ , $V_0=1\text{м}^2$ )	Энергия Ферми материала $E_F$ , Дж (при $l_0=1\text{м}$ , $S_0=1\text{м}^3$ )
	Материал			
1	Медь, образец 1	0,98	5,568	Нет данных о $I_{вч}$
2	Медь, образец 2	0,9	4,695	Нет данных о $I_{вч}$
3	Алюминий	0,96	5,34	Нет данных о $I_{вч}$
4	Свинец	0,65	2,448	Нет данных о $I_{вч}$
5	Стеклотекстолит фольгированный двухсторонний	0,64	2,376	Нет данных о $I_{вч}$
6	Полипропилен	0,4	0,924	Нет данных о $I_{вч}$

**3.4. Магнитопольной автоматический измеритель уровня и энергии Ферми**

Для осуществления автоматических измерений уровня и энергии Ферми предложено усовершенствовать техническое решение магнитопольного измерителя, приведенного на рис. 4, и дополнительно ввести в него микроконтроллер МК, отсчетно-регистрирующее устройство ОРУ, клавиатуру Кл и делитель частоты ДЧ, соединенные между собой и с другими функциональными блоками, как показано на рис 9. В этом магнитопольном измерителе для формирования высокочастотного тока (типа меандр) используется внутренний кварцевый генератор высокой частоты. Необходимое значение частоты сигнала формируется по программе, записанной в память микроконтроллера МК. С помощью делителя частоты ДЧ на два осуществляется сигнал требуемой формы. Усиление по току достигается за счет работы транзистора VT в ключевом режиме и установкой соответствующего напряжения питания на втором выходе источника питания ИП, к которому подключен, через катушку индуктивности L2, коллектор транзистора VT.

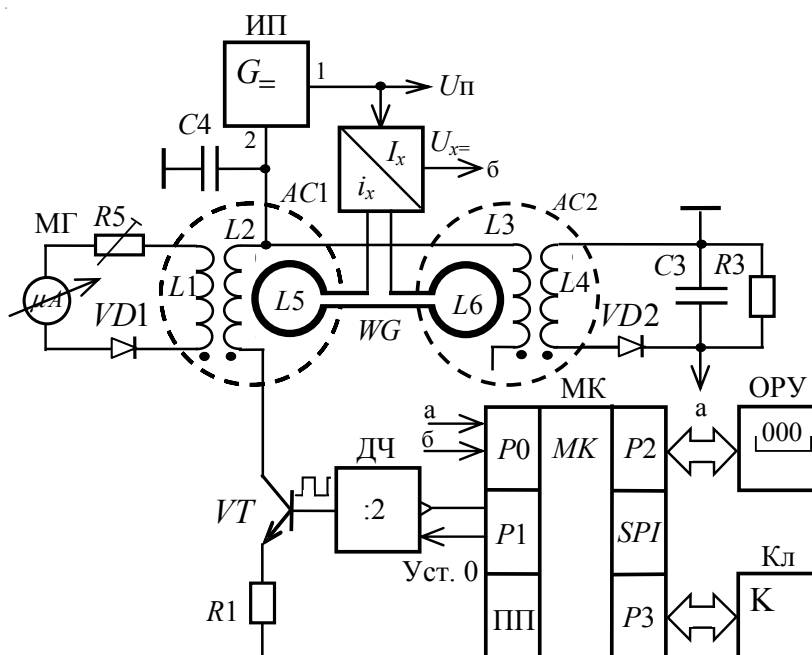


Рис. 9. Цифровой измеритель уровня и энергии Ферми

В целом процесс измерений осуществляется по команде, записанной в постоянную память микроконтроллера МК. Все данные по измеренным параметрам волновода и значениям сопротивления резистора и емкости конденсатора RC –нагрузки априори заносятся в память МК с помощью клавиатуры Кл. Полностью автоматизировать процесс измерений пока не удастся в связи с ручной заменой и установкой волновода WG.

Таким образом, приведенные методы и магнитопольные измерители обеспечивают решение поставленной технической задачи.

**Выводы.** Впервые в мире остро поставлен вопрос о различии понятий «уровень Ферми» и «энергия Ферми» и их единиц измерений в системе СИ.

Необходимость развития магнитопольных методов измерений уровня и энергии Ферми не вызывает сомнения ввиду важности указанных величин при оценке и сравнении качества материалов.

Развитие магнитопольной теории измерений обуславливает необходимость разработки нормативных документов и единых требований к нормируемым параметрам, форме и технологии изготовления волноводов из образцов исследуемых материалов.

Подробно описана сущность методов измерения уровня и энергии Ферми, показаны их различия. Впервые в мире приведены уравнения связи между физическими величинами, измеряемыми при определении энергетического уровня Ферми и энергии Ферми материалов.

Предложены уравнения измерений энергетического уровня Ферми и энергии Ферми материалов при нормальных условиях проведения измерений, учитывающие не частные размеры волноводов, а размеры, приведенные к единицам измерений в СИ.

Впервые в мире разработаны технические решения магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми, защищенные патентами Украины, описана их работа, отличия и особенности реализации.

Наибольший интерес представляют магнитопольные измерители уровня и энергии Ферми на микроконтроллерах или на микроконверторах. Они обеспечивают наибольший уровень автоматизации процесса измерений и высокую точность измерений.

Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения магнитопольной теории измерений и сущность физических процессов, протекающих в материале при воздействии на его соленоидальным импульсным магнитным полем высокой частоты.

Полученные результаты расширяют наши представления о магнитопольных методах и средствах измерений уровня и энергии Ферми при нормальных условиях проведения этих измерений.

Особое внимание следует обратить на проведение всего объема экспериментальных исследований с использованием предложенных технических решений магнитопольных измерителей уровня и энергии Ферми и на уточнение используемых моделей.

### Литература

1. Кондратов В.Т. Магнитопольный эффект / В.Т. Кондратов // Матеріали 17-ї МНТК Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 8–13 червня 2017 р., м. Одеса (Затока). – 2017. – С. 64–67.
2. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: проблема измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Тезисы докладов 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 2016), м. Одеса (Затока), 10–15 червня. — С. 27–30.
3. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: проблема измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Тезисы докладов 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 2016), м. Одеса (Затока), 10–15 червня. – С. 27–30.
4. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 1. Философские аспекты теории / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 4. – С. 222–233.
5. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2. Атрибуты магнитопольных эффектов / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2018. — № 1. — С. 7–14.
6. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2.1. Условия проявления магнитопольных эффектов и явлений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2018. — № 1. — С. 15–31.
7. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 3. Явление переноса, используемые фундаментальные законы, условия и проблемы измерений / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5. – С. 165–178.
8. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 4. Магнитопольные методы и измерительные преобразователи / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6. – С. 183–197.
9. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 5. Физические эффекты и методы измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 220–231.
10. Патент України на винахід № 115190. Спосіб вимірювального перетворення фізичних величин та пристрій для його здійснення / Кондратов В.Т. – Бюл. № 7, 10.04.2017.
11. Патент України на винахід № 117538. Спосіб магнітопольного перетворення енергії негативно

заряджених квазічастинок матеріалу (речовини) або дискретних енергетичних рівнів Ландау у напругу і в адекватну енергію радіоімпульса / Кондратов В.Т. – Бюл. № 15, 10.08.2018.

12. Патент України на винахід № 117759. Спосіб визначення внутрішньої енергії Фермі простих речовин та пристрій для його здійснення / Кондратов В.Т., Чернецкий В.В. – Бюл. № 18, 25.09.2018.

13. Ферми-енергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/4302.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/4302.html)

14. Энергия Ферми [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs\\_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f\\_1--oNWRcI](https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f_1--oNWRcI)

15. Уровень Ферми [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsviatat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level\\_fermi](https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsviatat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level_fermi)

16. Как образуются свободные электроны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA\\_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F\\_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B](https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B)

### References

1. Kondratov V.T. Magnitopolevoj effekt / V.T. Kondratov // Materiali 17-yi MNTK Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah», 8–13 chervnya 2017 r., m. Odesa (Zatoka). – 2017. – S. 64–67.

2. Kondratov V.T. Fundamentalnaya setrologii: problema izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // Tezisy dokladov 16-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah» (VOTTP-15 2016), m. Odesa (Zatoka), 10–15 chervnya. — S. 27–30.

3. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya: problema izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // Tezisy dokladov 16-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah» (VOTTP-15 2016), m. Odesa (Zatoka), 10–15 chervnya. — S. 27–30.

4. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 1. Filosofskie aspekty teorii / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 4. – S. 222–233.

5. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 2. Atributy magnitopolevyh effektov / V.T. Kondratov // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah. — 2018. — № 1. — S. 7 – 14.

6. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 2.1. Usloviya proyavleniya magnitopolevyh effektov i yavlenij / V.T. Kondratov // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologichnih procesah. — 2018. — № 1. — S. 15–31.

7. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 3. Yavlenie perenosa, ispolzuemye fundamentalnye zakony, usloviya i problemy izmerenij / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 5. – S. 165–178.

8. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 4. Magnitopolevye metody i izmeritelnye preobrazovateli / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2018. – № 6. – S. 183–197.

9. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 5. Fizicheskie efekty i metody izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 220–231.

10. Patent Ukrayini na vinahid № 115190. Sposib vimiryuvalnogo peretvorenniya fizichnih velichin ta pristrij dlya jogo zdijsnennya / Kondratov V.T. – Byul. № 7, 10.04.2017.

11. Patent Ukrayini na vinahid № 117538. Sposib magnitopolevogo peretvorenniya energiyyi negativno zaryadzenih kvazichastinok materialu (rečovini) abo diskretnih energetichnih rivniv Landau u naprugy i v adekvatnu energiyu radioimpulsa / Kondratov V.T. – Byul. № 15, 10.08.2018.

12. Patent Ukrayini na vinahid № 117759. Sposib viznachennya vnutrishnoyi energiyyi Fermi prostih rečovin ta pristrij dlya jogo zdijsnennya / Kondratov V.T., Cherneckij V.V. – Byul. № 18, 25.09.2018.

13. Ферми-енергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/4302.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/4302.html)

14. Energiya Fermi [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : [https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs\\_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f\\_1--oNWRcI](https://www.google.com/search?client=firefox-b&ei=VlSkXJ7iMfKhrqTewbfQDg&q=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&oq=%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F+%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B8&gs_l=psy-ab.1.0.0i6712j0i7130j0i67j0i6.18110.18110..20868..0.0.0.94.94.1.....0....1.gws-wiz.....0i71.f_1--oNWRcI)

15. Uroven Fermi [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : [https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsviatat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level\\_fermi](https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/adsorbciavsviatat-vseh-na-poverhnost/chemisorption/level_fermi)

16. Kak obrazuyutsya svobodnye elektrony [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : [https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA\\_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F\\_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B](https://etherdynamics.wiki/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BA_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%81%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%8B)

Рецензія/Peer review : 12.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Прорецензовано редакційною колегією