

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО.

Часть 9. Магнитные измерители удельной электропроводности полупроводниковых материалов

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитопольевой теории и методов измерений физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал. В статье изложена сущность методов косвенных измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов. Описаны схемотехнические решения магнитопольевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов. Установлено три разновидности магнитопольевых методов измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов: метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия); метод, использующий пространственное инвертирование волновода и организацию движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двухнаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений); метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки (двухнаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В последнем случае используется поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на левый и правый плоские контура волновода. Показана возможность измерения не только удельной электропроводности, но и других физических величин, характеризующие исследуемый материал: плотность тока в контуре волновода, объем материала волновода, количество электронов в этом объеме, а также число электронов в 1 м^3 этого материала. Базовыми функциональными элементами магнитопольевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов являются: генератор «пачек» импульсов высокой частоты, обеспечивающий получение соленоидального импульсного магнитного поля той же частоты, а также плоский двухконтурный волновод, выполненный из исследуемого материала. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольевые методы и средства измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов.

Ключевые слова: магнитопольевые методы, измерение, удельная электропроводность материалов.

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 9. MAGNETIC-FIELD ELECTRICAL CONDUCTIVITY METERS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

This article is a further development of the magnetic-field theory and methods for measuring physical quantities based on the phenomenon of energy and information transfer through the material. The article describes the essence of indirect methods for measuring the electrical conductivity of semiconductor materials. Circuitry solutions of magnetic-field conductivity meters of semiconductor materials are described. Three types of magnetic-field methods for measuring the electrical conductivity of semiconductor materials have been established: a method that uses spatial inversion of a waveguide (rotate it 180° along the large (longitudinal) axis of symmetry) and organize the movement of electrons only clockwise (unidirectional exposure process); a method that uses spatial inversion of the waveguide and the organization of the movement of electrons both clockwise and counter clockwise (bidirectional exposure process, providing doubled measurement accuracy); a method that uses the organization of the movement of electrons clockwise and counter clockwise (a bi-directional process of exposure, but without spatial inversion of the waveguide. In the latter case, the alternating action of the high frequency solenoidal pulsed magnetic field on the left and right flat waveguide contours is used. The possibility of measuring not only electrical conductivity, but also other physical quantities characterizing the material under study: current density in the waveguide circuit, volume of the waveguide material, the number of electrons in this volume, and the number of electrons in 1 m^3 this material is shown. The basic functional elements of magnetic field conductivity meters of semiconductor materials are: a generator of "bundles" of high-frequency pulses, providing a solenoidal pulsed magnetic field of the same frequency, as well as a two-loop flat waveguide made of the material under study. The described circuit solutions of the conductivity meters of semiconductor materials expand our understanding and knowledge of the newest direction in metrology – magnetic-field methods and measuring instruments. The work is of interest to metrologists, specialists, masters and graduate students studying magnetic field methods and means of measuring the electrical conductivity of semiconductor materials.

Keywords: magnetic-field methods, measurement, electrical conductivity of materials.

По-прежнему актуальной является задача разработки и описания особенностей работы и функциональных возможностей схемотехнических решений магнитопольевых измерителей (МПИ) удельной электропроводности (УЭП) полупроводниковых материалов.

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитопольевой (МП) теории измерений (ТИ) в части измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов.

В работе описаны результаты решения технической задачи создания МПИ УЭП полупроводниковых материалов (собственно полупроводников, полупроводников n -типа и p -типа),

реализующих новейший физический принцип измерений, основанный на явлении переноса энергии и информации сквозь материал (см. [1, 2]). При этом МПИ УЭП должны иметь достаточно высокую точность измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов в заданном частотном и температурном диапазонах, иметь расширенные функциональные возможности в части определения значений не только удельной электропроводности полупроводниковых, но и проводниковых и диэлектрических материалов, плотности тока переноса, количества электронов в исследуемом материале, напряженности электрического поля в материале, длины свободного пробега электронов, а также прогнозировать наличие в материале волновода примесей донорного или рецепторного типа. При этом ограничения для измерений может быть только невозможность изготовления волновода заданной конфигурации и размеров из исследуемого образца материала.

Объектом исследований являются магнитолевые методы и средства измерений физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал.

Предметом исследований являются магнитолевые методы и средства измерений удельной электропроводности полупроводниковых материалов.

Результаты исследований

Рассмотрим сущность магнитолевого метода измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов, а затем работу трех вариантов магнитолевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов, реализующих этот метод.

1. Магнитолевой метод определения удельной электропроводности полупроводниковых материалов

Магнитолевой метод определения удельной электропроводности полупроводниковых материалов реализуется при наличии механической системы замкнутого типа, которая включает в себя плоский двухконтурный волновод, изготовленный из исследуемого материала, нескольких катушек индуктивности, размещенных соосно и перпендикулярно первому и второму контурам плоского двухконтурного волновода соответственно, а также четное количество ферритовых броневых сердечников, используемые для размещения в них катушек индуктивности и для экранирования их от действия внешних магнитных полей и помех.

В зависимости от вида исследуемого материала волновода, обозначим физические величины (напряжения, токи, энергии и т.д.) с нижними индексами: «*m*» (металл), «*g*» (собственный полупроводник), «*n*» (полупроводник *n*-типа), «*p*» (полупроводник *p*-типа) и «*d*» (диэлектрик).

В соответствии с физическим принципом измерений, выполняются следующие физические операции (действия) описываемого метода измерений. Вначале формируется соленоидальное импульсное магнитное поле высокой или сверхвысокой частоты с энергией магнитного поля: $W_{om} = L_0 I_{om}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности металлов); $W_{og} = L_0 I_{og}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности собственных полупроводников; $W_{on} = L_0 I_{on}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности полупроводников *n*-типа; $W_{op} = L_0 I_{op}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности полупроводников *p*-типа; $W_{od} = L_0 I_{od}^2 / k_2$, — при измерении удельной электропроводности диэлектриков, где I_{om} , I_{og} , I_{on} , I_{op} и I_{od} — соответствующие максимальные импульсные значения тока через катушку индуктивности L_0 ; $k_2 = 2$. В течение нечетных полупериодов низкой частоты коммутации, соленоидальным импульсным магнитным полем высокой частоты воздействуют на электроны материала первого контура плоского волновода, причем под прямым углом к его поверхности. В результате возникают принудительные колебания (движение) электронов в материале и движение их по замкнутому контуру плоского двухконтурного волновода, например, слева на право или справа на лево.

Совершая продольные колебания под действием импульсного магнитного поля высокой частоты, электроны генерируют продольную электромагнитную волну. Высокочастотная электромагнитная волна, возникшая в материале левого высокочастотного колебательного контура, передается в правый высокочастотный колебательный контур по однопроводной линии связи. Благодаря движению слева направо (от точки «1» до точки «2» траектории) по замкнутому кругу плоского двухконтурного волновода, электроны совершают определенную работу. Тем самым устанавливается связь между координатами и скоростями в двух разных точках «1» и «2» траектории движения этих электронов.

Высокочастотные колебания, возбужденные в левом и правом высокочастотных колебательных контурах поочередно, трансформируются в высокочастотные напряжения $u_o(t)$ и $u_x^\pm(t)$ на выходах левой и выходных катушек индуктивности. Указанные высокочастотные напряжения выпрямляются, сглаживаются (фильтруются) и измеряются. Полученные значения напряжений U_o и $U_x^\pm$ запоминаются.

Следует отметить, что в зависимости от вида и типа исследуемого материала волновода (металла, собственного полупроводника, полупроводника *n*-типа или *p*-типа или диэлектрика) выбирается и соответствующая напряженность соленоидального импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты. Нормированные по значению напряжения обозначим следующим образом: U_{om} , U_{og} , U_{on} , U_{op} и U_{od} .

По значениям напряжений U_{om} , U_{og} , U_{on} , U_{op} и U_{od} судят о действующем значении априори заданного (сверх) высокочастотного тока, текущего в контуре левой катушки индуктивности, а по значениям напряжений $U_x^\pm$ судят как о токе $I_x^\pm$, текущем по контуру волновода за счет движения электронов в прямом направлении — слева на право (знак «+») или в обратном — справа на лево (знак «-»), так и о электропроводности материала и о количестве электронов, которые навели электродвижущую силу.

Одновременно измеряются действующие значения тока I_x в прямом и обратном направлениях (I_{xm}^+ и I_{xm}^- , I_{xg}^+ и I_{xg}^- , I_{xn}^+ и I_{xn}^- , I_{xp}^+ и I_{xp}^- , I_{xd}^+ и I_{xd}^-), обусловленного движением электронов внутри замкнутого контура волновода, причем в месте их наибольшей плотности, то есть в месте соединения двух контуров плоского волновода проводниками, нормированными по значению площади сечения ΔS_0 .

После этого определяется средняя длина $\bar{l}_e$ свободного пробега электронов по уравнению величин

$$\bar{l}_{ex} = b_x / k_2 \text{ [м]}, \quad (1)$$

где b_x – период кристаллической решётки материала, из которого изготовлен волновод; $k_2 = 2$.

Для указанных выше материалов имеют место следующие соотношения: $\bar{l}_{em} = b_m / k_2 \text{ [м]}$, $\bar{l}_{eg} = b_g / k_2 \text{ [м]}$, $\bar{l}_{en} = b_n / k_2 \text{ [м]}$, $\bar{l}_{ep} = b_p / k_2 \text{ [м]}$, $\bar{l}_{ed} = b_d / k_2 \text{ [м]}$.

Об удельной электропроводности исследуемого материала, в случае движения электронов слева на право (по часовой стрелке – прямое направление движения, – «+») и справа на лево (против часовой стрелки – обратное направление движения – «-») судят по определенным уравнениям величин:

А. Для металлических волноводов (при $\{\bar{l}_e\} = \{\bar{l}_{em}\}$, токах проводимости I_{xm}^+ , I_{xm}^- и напряжениях U_{xm}^+ , U_{xm}^-) удельная электропроводность определяется согласно уравнениям величин

$$\sigma_{xm}^+ = \frac{I_{xm}^+}{U_{xm}^+} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{em}} \text{ См/м}, \quad (2)$$

$$\sigma_{xm}^- = \frac{I_{xm}^-}{U_{xm}^-} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{em}} \text{ См/м}. \quad (3)$$

В случаях, когда волновод выполнен из чистого металла, разница значений удельной электропроводности, полученных согласно уравнениям величин (2) и (3), равна нулю, т.е. $\{\sigma_{xm}^+\} - \{\sigma_{xm}^-\} = 0$.

Если $\{\sigma_{xm}^+\} - \{\sigma_{xm}^-\} > 0$, то материал волновода имеет примеси n -типа, а при $\{\sigma_{xm}^+\} - \{\sigma_{xm}^-\} < 0$ — p -типа.

Б. Для волноводов, выполненных из собственного полупроводника (то есть из химически чистого кристаллического полупроводника без примесей) при $\{\bar{l}_e\} = \{\bar{l}_{eg}\}$, токах I_{xg}^+ , I_{xg}^- , и напряжениях U_{xg}^+ и U_{xg}^- обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин:

$$\sigma_{xg}^+ = \frac{I_{xg}^+}{U_{xg}^+} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{eg}} \text{ См/м}, \quad (4)$$

$$\sigma_{xg}^- = \frac{I_{xg}^-}{U_{xg}^-} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{eg}} \text{ См/м}. \quad (5)$$

Если материалом волновода является химически не чистый полупроводник, то, при $\{\sigma_{xg}^+\} - \{\sigma_{xg}^-\} > 0$, материал содержит донорную примесь, а при $\{\sigma_{xg}^+\} - \{\sigma_{xg}^-\} < 0$ — рецепторную.

В. Для волноводов, выполненных из полупроводника n -типа (то есть с электронным типом проводимости) при $\{\bar{l}_e\} = \{\bar{l}_{en}\}$, токах I_{xn}^+ , I_{xn}^- и напряжениях U_{xn}^+ и U_{xn}^- обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин:

$$\sigma_{xn}^+ = \frac{I_{xn}^+}{U_{xn}^+} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{en}} \text{ См/м}, \quad (6)$$

$$\sigma_{xn}^- = \frac{I_{xn}^-}{U_{xn}^-} \cdot \frac{1}{\bar{l}_{en}} \text{ См/м}. \quad (7)$$

Если материалом волновода является полупроводник n -типа, то при $\{\sigma_{xn}^+\} - \{\sigma_{xn}^-\} > 0$ материал также содержит донорные примеси, а при $\{\sigma_{xn}^+\} - \{\sigma_{xn}^-\} < 0$ – рецепторные примеси;

г) для полупроводников p -типа (с дырочной проводимостью), при $\{\bar{l}_e\} = \{\bar{l}_{ep}\}$, токах I_{xp}^+ , I_{xp}^- и напряжениях U_{xp}^+ и U_{xp}^- , обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется согласно уравнениям величин:

$$\sigma_{xp}^+ = \frac{I_{xp}^+}{U_{xp}^+} \cdot \frac{1}{l_{ep}} \text{ См/м}, \quad (8)$$

$$\sigma_{xp}^- = \frac{I_{xp}^-}{U_{xp}^-} \cdot \frac{1}{l_{ep}} \text{ См/м}. \quad (9)$$

В случае, когда материалом волновода является полупроводник p -типа, то, при $\{\sigma_{xp}^+\} - \{\sigma_{xp}^-\} > 0$, он содержит рецепторную примесь, а при $\{\sigma_{xp}^+\} - \{\sigma_{xp}^-\} < 0$ — донорную примесь;

д) для диэлектриков, при $\{\bar{l}_e\} = \{\bar{l}_{ed}\}$, токах I_{xd}^+ , I_{xd}^- , и напряжениях U_{xd}^+ и U_{xd}^- , обусловленных движением электронов, удельная электропроводность определяется по уравнениям величин

$$\sigma_{xd}^+ = \frac{I_{xd}^+}{U_{xd}^+} \cdot \frac{1}{l_{ed}} \text{ См/м} \quad (10)$$

и

$$\sigma_{xd}^- = \frac{I_{xd}^-}{U_{xd}^-} \cdot \frac{1}{l_{ed}} \text{ См/м}. \quad (11)$$

В тех случаях, когда волновод выполнен из диэлектрика и $\{\sigma_{xd}^+\} - \{\sigma_{xd}^-\} = 0$, материал волновода примесей не содержит. При $\{\sigma_{xd}^+\} - \{\sigma_{xd}^-\} > 0$ материал волновода содержит донорные примеси, а при $\{\sigma_{xd}^+\} - \{\sigma_{xd}^-\} < 0$ — рецепторные примеси.

Описанный магнитолевой метод обеспечивает также определение плотности тока, количества электронов в 1 м^3 исследуемого материала и зависимость удельной электропроводности от температуры материала волновода, то есть $\sigma_x^+(T_x)$ и $\sigma_x^-(T_x)$.

О плотности тока судят по уравнению величин

$$J_x = \frac{I_x}{\Delta S_0} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right], \quad (12)$$

где ΔS_0 — априори заданная площадь поперечного сечения плоского двухконтурного волновода (в месте разрыва цепи) или площадь сечения проводников, с помощью которых подключается измеритель тока (например $\Delta S_0 = 1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

О количестве электронов в 1 м^3 исследуемом материале судят по уравнению величин

$$N_e = \frac{I_x V_0}{q_e V_x} \left[\frac{\text{А} \cdot \text{м}^3}{\text{К} \cdot \text{м}^3} \right] = \frac{I_x}{q_e} \left[\frac{\text{А}}{\text{К}} \right], \quad (13)$$

где V_x — априори вычисленный объем материала волновода, м^3 ; $V_0 = 1 \text{ м}^3$ — (нормированный) объем материала волновода в СИ.

При вычислениях плотности тока и количества электронов по уравнениям величин (10) и (11) учитываются действующие значения тока I_x , текущего в прямом и обратном направлениях: I_{xm}^+ и I_{xm}^- , I_{xp}^+ и I_{xp}^- , I_{xd}^+ и I_{xd}^- того или иного материала.

Необходимо различать три разновидности магнитолевого метода измерения удельной электропроводности материалов:

1-й метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия). В этом методе осуществляется одноконтурное измерение зависимостей $U_x^+(T_x)$, $I_x^+(T_x)$, $\sigma_x^+(T_x)$, $J_x^+(T_x)$, $U_0^+(T_x)$ и $N_e^+(T_x)$ — при исходном положении волновода, и зависимостей $U_x^-(T_x)$, $I_x^-(T_x)$, $\sigma_x^-(T_x)$, $J_x^-(T_x)$, $U_0^-(T_x)$ и $N_e^-(T_x)$ — при пространственно инвертированном положении волновода вдоль своей большой оси. При определении температурных характеристик в обоих случаях используется электрический нагрев волновода;

2-й метод основан на пространственном инвертировании волновода и организации движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений). В данном методе проводятся двухтактные измерения: а) в первом такте – физических величин U_x^+ , I_x^+ , σ_x^+ , J_x^+ , U_0^+ и N_e^+ при заданном (нормированном) значении температуры T_0 и исходном положении волновода; б) во втором такте – физических величин U_x^- , I_x^- , σ_x^- , J_x^- , U_0^- и N_e^- , причем все измерения проводятся при нормальной температуре T_0 , пространственно инвертированном положении волновода и без его электрического нагрева;

3-й метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки, — двунаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В этом методе используются поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на левый и правый плоские контура волновода, а также двухтактные измерения физических величин, — без пространственного инвертирования положения волновода и без искусственного нагрева волновода.

Указанные магнитопольевые методы измерения реализуются тремя различными комбинированными схемами (вариантами) магнитопольевых измерителей удельной электропроводности материалов,

2. Магнитопольевые измерители удельной электропроводности полупроводниковых материалов

Рассмотрим три варианта схемотехнических решения МПИ УЭП и их особенности. Следует отметить, что от выбора материала для исследований определяются и значения тех входных параметров, которые априори записываются в память микроконвертора. В общем случае определяются значения таких величин, как: U_0 , b_x или $\bar{l}_e$, ΔS_0 , температурный диапазон нагрева материалов – $T_0, \dots, T_k$ с шагом, например, 5 градусов ($\Delta T = 5^\circ \text{C}$), и геометрические параметры волновода (толщина Δh , площадь S и объем V).

Вариант 1

На рис. 1 приведена комбинированная схема цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов, где введены следующие обозначения: КИП1 и КИП2 — первый и второй кодоуправляемые источники питания; А — амперметр; В — вольтметр; ПТК — преобразователь «ток-код»; СТ — сенсор температуры; ЦИТ — цифровой измеритель температуры (преобразователь «температура-код»; МК — микроконвертор; ЦОУ — цифровое отсчетное устройство; КЛ — клавиатура; Тг — триггер; VT1 и VT2 — первый и второй транзисторы; КР — кварцевый резонатор; R1 и R2 — первый и второй резисторы; C1 и C2 — первый и второй конденсаторы; ДВ1 и ДВ2 — первый и второй двухполупериодные выпрямители; WG — плоский двухконтурный волновод; L1, L2 и L3, L4 — первая, вторая, третья и четвертая катушки индуктивности, расположенные на первом и втором цилиндрических каркасах (на рис. 1 не показано) соответственно; L5 и L6 — первый и второй контуры волновода; БС1 и БС2 — первый и второй ферритовые броневи сердечники; ОШ — общая шина.

При исследовании, например, полупроводников n -типа, в память микроконвертора вводятся значения следующих величин: $U_{оп}$, $\bar{l}_{en}$, ΔS_0 , $T_0, \dots, T_k$, $\Delta T = 5^\circ \text{C}$, Δh_n , S_n и V_n .

После включения питания, по заданной программе, записанной в память микроконвертора МК, на цифровые входы кодоуправляемого источника питания КИП из порта P2 через общую шину ОШ поступает цифровой сигнал, при котором на первом выходе КИП1 формируется напряжение питания, подаваемое через катушку индуктивности L2 на коллектор первого транзистора VT1. При этом коллектор второго транзистора VT2 соединён с его базой (диодное включение транзистора 13).

После включения питания начинает работать генератор сигнала (сверх)высокой частоты, выполненный на элементах VT1, VT2, WQ, R1, R2, C1 и C2 (рис. 1). Для формирования пачек высокочастотных импульсов типа меандр, на базы транзисторов VT1 и VT2 с парафазных выходов триггера Тг поступают сигналы низкой частоты коммутации (также типа меандр) (см. рис. 1).

При этом на счетный вход триггера Тг поступает входной сигнал низкой частоты с выхода порта P0 микроконвертора МК, задаваемый по определенной программе. В результате на материал контура L5 волновода WG в отрицательные полупериоды частоты коммутации начинает воздействовать соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты.

На диаметрально противоположные контакты волновода WG подается напряжение с выходов «1» и «2» кодоуправляемого источника питания КИП2. Электрически ток априори заданного значения протекает через волновод WG и нагревает его до заданной температуры T_x . Контроль значений напряжения и тока через волновод WG осуществляется с помощью амперметра А и вольтметра В (рис. 1). Контроль температуры нагрева T_x осуществляется с помощью цифрового измерителя температуры ЦИТ с встроенным сенсором температуры СТ.

В результате действия температуры и соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты, свободные электроны материала контура L5 волновода WG начинают двигаться по его замкнутому контуру, состоящему из параллельно включенных плоских контуров L5 и L5. В замкнутом контуре волновода WG возникает высокочастотный ток переноса $i_{хп}(t)$.

На выходах первого и второго двухполупериодного выпрямителей ДВ1 и ДВ2 появляются напряжения $U_{он}^+(T_x)$ и $U_{хп}^+(T_x)$, зависящие от вида материала и температуры волновода WG. Эти напряжения поочередно, по априори заданной программе поступают, через коммутатор каналов, на встроенный в микроконвертор МК аналого-цифровой преобразователь. Указанные напряжения преобразуются в соответствующие коды чисел и запоминаются в оперативной памяти МК.

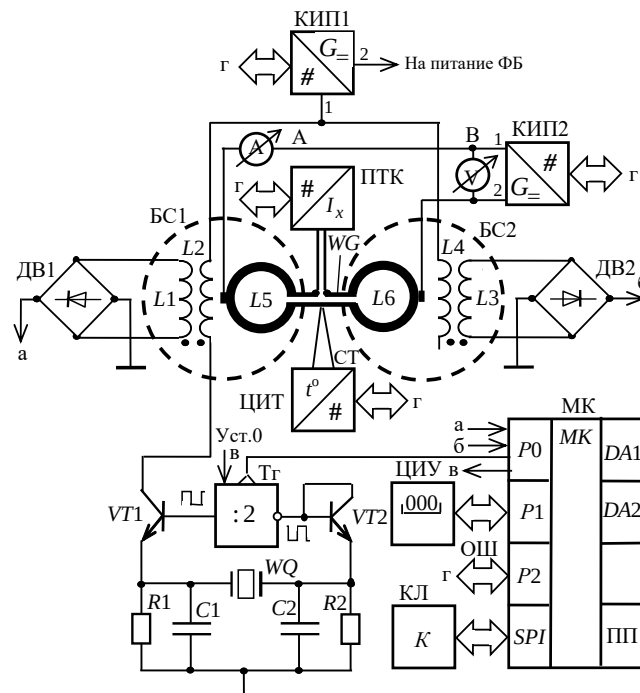


Рис. 1. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 1)

Высокочастотный ток переноса с помощью преобразователя «ток-код» ПТК преобразуется в действующее значение тока $I_{хп}^+$ и в соответствующий код числа $N_{хп}^+$. Последний через общую шину ОШ и цифровые входы-выходы порта P2, поступает в оперативную память микроконвертора МК. Далее устанавливается новое значение температуры нагрева волновода WG в пределах заданного диапазона значений температур $T_0, \dots, T_k$. Процесс измерения повторяется аналогичным образом, например, N раз.

После окончания указанных измерений осуществляется пространственное инвертирование положения волновода WG вдоль своей большой оси (поворот на 180°). Указав выше последовательность измерений повторяется аналогичным образом N раз при заданных дискретных значениях температуры нагрева T_x . Полученные результаты поступают в оперативную память микроконвертора МК и обрабатываются. Так, например, зависимость удельной электропроводности исследуемого полупроводника n-типа определяется по уравнениям величин (6) и (7), (12) и (13) при различных значениях температур как при прямом, так и при обратном движении электронов:

$$\sigma_{хп}^+(T_x) = \frac{I_{хп}^+(T_x)}{U_{хп}^+(T_x)} \cdot \frac{1}{l_{ен}} \text{ См/м}, \quad (14)$$

$$\sigma_{хп}^-(T_x) = \frac{I_{хп}^-(T_x)}{U_{хп}^-(T_x)} \cdot \frac{1}{l_{ен}} \text{ См/м}. \quad (15)$$

Причем, для каждого значения температуры определяется разность значений удельной электропроводности материала, которую сравнивают с нулем. При

$$\{\sigma_{хп}^+(T_x)\} - \{\sigma_{хп}^-(T_x)\} > 0 \quad (16)$$

материал волновода содержит донорную примесь, а при

$$\{\sigma_{хп}^+(T_x)\} - \{\sigma_{хп}^-(T_x)\} < 0 \quad (17)$$

— рецепторную.

$$J_x^+(T_x) = \frac{I_x^+(T_x)}{\Delta S_0} \left[\frac{A}{M^2} \right], \quad (18)$$

$$J_x^-(T_x) = \frac{I_x^-(T_x)}{\Delta S_0} \left[\frac{A}{M^2} \right], \quad (19)$$

$$\lg N_e = f(1/T_x), \quad (20)$$

Описанное техническое решение магнитопольевого измерителя имеет широкие функциональные возможности по определению температурных характеристик удельной электропроводности исследуемого материала волновода и по прогнозированию содержания в нём донорных или рецепторных примесей. Точность результатов измерений зависит от погрешностей используемых приборов и преобразователей: КИП1, КИП2, амперметра А, вольтметра В, ПТК, ЦИТ, а также от погрешности аналого-цифрового преобразователя, встроенного в МК.

На рис. 2 приведена комбинированная схема цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 2), где одноименные функциональные блоки обозначены также, как и на рис. 1, а новые блоки обозначены следующим образом: СЗ — развязывающий конденсатор; АП1 и АП2 — первый и второй автоматические переключатели. Последние включены, как показано на рис. 2. Второй вариант магнитополевого измерителя удельной электропроводности отличается от предыдущего двухтактным режимом работы: при исходном и пространственно инвертированном положениях волновода.

Такой режим обеспечивается путем введения в схему автоматических переключателей АП1 и АП2, подключенных определенным образом к другим элементам схемы (рис. 2). При этом электрический нагрев материала волновода не предусматривается, поскольку в некоторых случаях необходимы значительные затраты электрической мощности для нагрева волновода. При необходимости исследования температурных характеристик удельной электропроводности материалов, нагрев волновода может осуществляться неэлектрическим способом с последующим естественным или искусственным охлаждением априори нагретого волновода. Контроль температуры волновода также осуществляется с помощью ЦИТ.

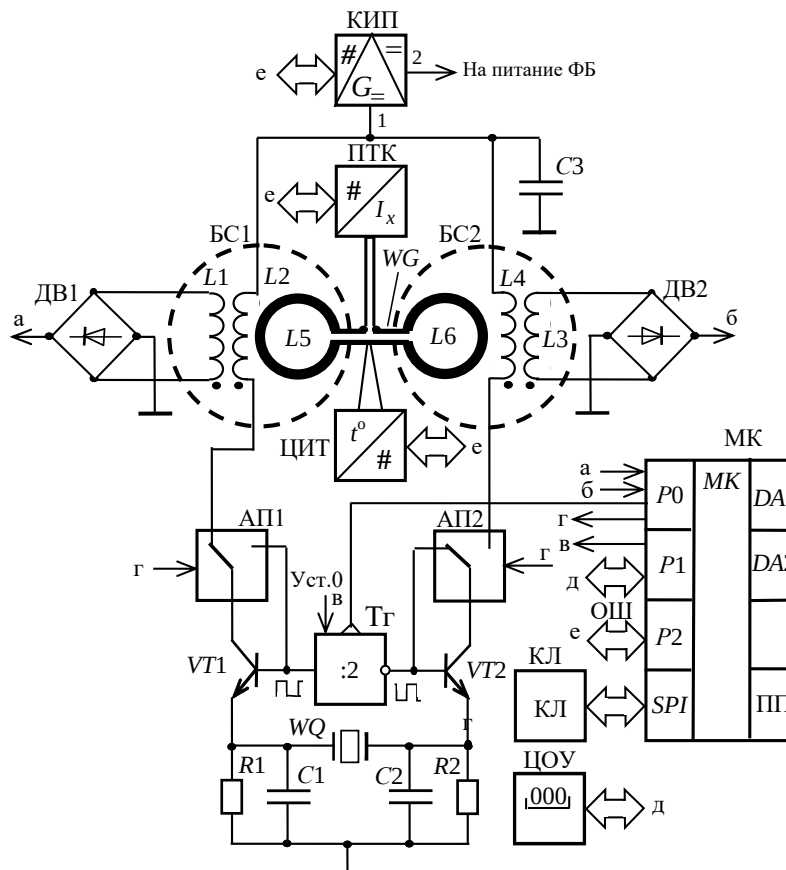


Рис. 2. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 2)

При измерениях удельной электропроводности, например, собственных полупроводников, в память микроконвертора МК вводятся значения следующих величин: U_{og} , $\overline{l_{eg}}$, ΔS_0 , T_0 , Δh_g , S_g и V_g .

Двухтактная работа измерителя связана с поочередным действием (в нечетные и четные полупериоды сигнала низкой частоты коммутации) соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты: то на электроны контура $L5$ волновода WG — через катушку индуктивности $L2$, то на электроны контура $L6$ волновода WG — через катушку индуктивности $L4$. Процесс измерения в первом и во втором тактах (при движении электронов по часовой стрелке) проводится при исходном положении волновода WG . После пространственного инвертирования волновода проводятся еще два такта измерений — уже при движении электронов против часовой стрелки.

Полученные результаты измерений записываются в оперативную память микроконвертора МК, где обрабатываются по соответствующим уравнениям величин:

в первые два такта (при движении электронов по часовой стрелке) — по уравнениям величин

$$\sigma_{xg1}^+ = \frac{I_{xg1}^+}{U_{xg1}^+} \cdot \frac{1}{l_{eg}} \text{ СМ/М}, \quad (21)$$

$$\sigma_{xg2}^+ = \frac{I_{xg2}^+}{U_{xg2}^+} \cdot \frac{1}{l_{eg}} \text{ СМ/М}, \quad (22)$$

во вторые два такта (при движении электронов против часовой стрелке) — по уравнениям величин

$$\sigma_{xg1}^- = \frac{I_{xg1}^-}{U_{xg1}^-} \cdot \frac{1}{l_{eg}} \text{ СМ/М}, \quad (23)$$

$$\sigma_{xg2}^- = \frac{I_{xg2}^-}{U_{xg2}^-} \cdot \frac{1}{l_{eg}} \text{ СМ/М}. \quad (24)$$

При этом определяется наиболее точный результат, — согласно уравнениям величин

$$\sigma_{xg\Sigma}^+ = (\sigma_{xg1}^+ + \sigma_{xg2}^+) / k_2 = \left[\frac{I_{xg1}^+}{U_{xg1}^+} + \frac{I_{xg2}^+}{U_{xg2}^+} \right] \cdot \frac{1}{l_{eg} k_2} \text{ СМ/М} \quad (25)$$

и

$$\sigma_{xg\Sigma}^- = (\sigma_{xg1}^- + \sigma_{xg2}^-) / k_2 = \left[\frac{I_{xg1}^-}{U_{xg1}^-} + \frac{I_{xg2}^-}{U_{xg2}^-} \right] \cdot \frac{1}{l_{eg} k_2} \text{ СМ/М}, \quad (26)$$

где $k_2 = 2$.

Дополнительно вычисляется плотность тока в первые два такта (при движении электронов по часовой стрелке), — согласно уравнению величин

$$J_{x1,2}^+ = \frac{I_{x1,2}^+}{\Delta S_0} \left[\frac{\text{А}}{\text{М}^2} \right], \quad (27)$$

где $I_{x1,2}^+ = I_{x1}^+ = I_{x2}^+$,

и во вторые два такта (при движении электронов против часовой стрелке), — согласно уравнению величин

$$J_{x1,2}^- = \frac{I_{x1,2}^-}{\Delta S_0} \left[\frac{\text{А}}{\text{М}^2} \right], \quad (28)$$

где $I_{x1,2}^- = I_{x1}^- = I_{x2}^-$.

Затем определяется разность сумм (слагаемых) (25) и (26) полученных значений удельной электропроводности материала, которая сравнивается с нулём. Прогнозируется, что при

$$\left[\{\sigma_{xg1}^+\} + \{\sigma_{xg2}^+\} \right] - \left[\{\sigma_{xg1}^-\} + \{\sigma_{xg2}^-\} \right] > 0 \quad (29)$$

материал волновода содержит донорную добавку, а при

$$\left[\{\sigma_{xg1}^+\} + \{\sigma_{xg2}^+\} \right] - \left[\{\sigma_{xg1}^-\} + \{\sigma_{xg2}^-\} \right] < 0 \quad (30)$$

— рецепторную.

По сравнению с первым, второй вариант магнитопольного измерителя обеспечивает повышение точности измерений удельной электропроводности исследуемого материала волновода за счет двухтактной

работы измерителя и использования уравнений величин (25) и (26). Согласно уравнений величин (29) и (30), описанное техническое решение также дает возможность прогнозирования содержания в материале волновода донорных или рецепторных примесей.

Вариант 3

На рис. 3 приведена комбинированная схема третьего варианта цифрового измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов, где, по сравнению с предыдущими схемами, новые функциональные блоки обозначены как: $VD1$ и $VD2$ — первый и второй диоды; $МГ1$ и $МГ2$ — первая и вторая микрометрические головки; $ПР1$ и $ПР2$ — первый и второй подстроечные резисторы; $L7$ и $L8$ — седьмая и восьмая катушки индуктивности. Последние расположены, соответственно, на третьем и четвертом цилиндрических каркасах (на рис. 3 не показано).

Недостатком первого и второго вариантов описанных технических решений магнитопольных измерителей является наличие дополнительных затрат времени на осуществление пространственного инвертирования волновода с целью изменения направления движения электронов на противоположное. Эту задачу можно решить иначе, — путем дополнительного введения в измеритель и размещения нескольких катушек индуктивности, формирующих соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты и реагирующих на его действие.

Отличительной особенностью работы предложенного МПИ УЭП является следующее. В нечетные полупериоды сигнала низкой частоты коммутации (автоматические переключатели $АП1$ и $АП2$ находятся в положении, показанном на рис. 3) ток высокой частоты течет через транзистор $VT1$ и катушку индуктивности $L2$.

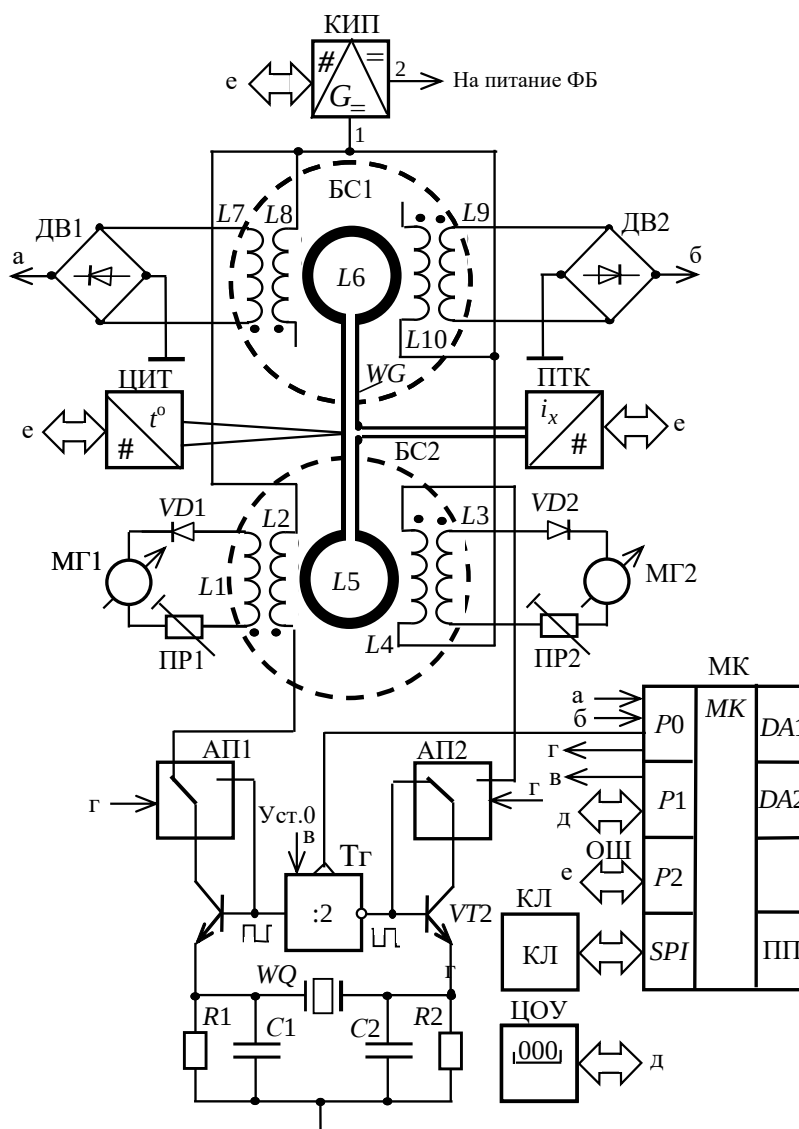


Рис. 3. Комбинированная схема магнитопольного измерителя удельной электропроводности полупроводниковых материалов (вариант 3)

В четные полупериоды сигнала низкой частоты коммутации ток высокой частоты течет через транзистор $VT2$ и катушку индуктивности $L4$, поскольку автоматические переключатели $АП1$ и $АП2$ находятся в положениях, противоположных указанному на рис. 3).

На выходах первого и второго двухполупериодных выпрямителей ДВ1 и ДВ2 появляются напряжения U_{xni}^+ и U_{xni}^- , которые поочередно, по заданной программе поступают, через коммутатор каналов, на встроенный в микроконвертор МК аналого-цифровой преобразователь. Указанные напряжения преобразуются в соответствующие коды чисел и запоминаются в оперативной памяти микроконвертора. Одновременно измеряются и запоминаются значение тока в замкнутом контуре волновода WG и значение температуры. Обработка полученных данных осуществляется по программе, записанной в память микроконвертора МК.

Особенностью конструкции измерителя является то, что катушки индуктивности $L2$ и $L4$, $L1$ и $L3$ располагаются соосно с осью контура $L5$ волновода WG , но по разные (диаметрально противоположные) стороны. Так же расположены и катушки индуктивности $L8$ и $L10$, $L7$ и $L9$, — соосно со вторым контуром $L6$ волновода WG .

Второй особенностью является введение отрицательной обратной связи (см. последовательно соединенные элементы $L1$, $VD1$, $МГ1$, $ПР1$ и элементы $L3$, $VD2$, $МГ2$, $ПР2$) по магнитным потокам с целью стабилизации индукции магнитного поля. Введение отрицательной обратной связи направлено на повышение точности измерений.

Третьей особенностью технического решения третьего варианта измерителя является однокантный режим работы, при котором обеспечивается принудительное движение электронов в замкнутом контуре волновода WG сначала по часовой стрелке (индекс «+»), а затем — против часовой стрелки (индекс «-»). Процесс измерения в каждом из этих случаев включает по 10-50 тактов частоты коммутации. Это дает возможность дополнительно провести усреднение N результатов измерений, с целью повышения точности полученных результатов. В этом случае средние значения напряжений ДВ1 и ДВ2 определяются по уравнениям величин (при использовании в качестве материала волновода, например, полупроводника n -типа)

$$\overline{U_{xn}^+} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{xni}^+ \text{ В} \quad (31)$$

и

$$\overline{U_{xn}^-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{xni}^- \text{ В}, \quad (32)$$

а средние значения удельной электропроводности определяются согласно уравнениям величин

$$\overline{\sigma_{xn}^+} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{xni}^+ \text{ См/м}, \quad (33)$$

$$\overline{\sigma_{xn}^-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{xni}^- \text{ См/м}, \quad (34)$$

После этого определяется разность значений удельной электропроводности материала, полученные согласно (33) и (34), которая сравнивается с нулем. При

$$\left\{ \overline{\sigma_{xn}^+} \right\} - \left\{ \overline{\sigma_{xn}^-} \right\} > 0 \quad (35)$$

полагают, что материал волновода содержит донорную примесь, а при

$$\left\{ \overline{\sigma_{xn}^+} \right\} - \left\{ \overline{\sigma_{xn}^-} \right\} < 0 \quad (36)$$

— рецепторную.

Средние значения плотности тока определяются согласно уравнениям величин

$$\overline{J_{xn}^+} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_{xni}^+ = \frac{1}{\Delta S_0 N} \sum_{i=1}^N I_{xni}^+ \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right] \quad (37)$$

и

$$\overline{J_{xn}^-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_{xni}^- = \frac{1}{\Delta S_0 N} \sum_{i=1}^N I_{xni}^- \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right]. \quad (38)$$

Следует отметить, что данный вариант технического решения магнитополевого измерителя обеспечивает измерение удельной электропроводности любого материала (не только полупроводникового). Главное, чтобы из этого материала можно было изготовить плоский двухконтурный волновод.

Как и в предыдущих вариантах, в третьем варианте измерителя предусмотрен контроль рабочей температуры нагрева волновода.

Техническое решение третьего варианта магнитополевого измерителя обеспечивает: измерение удельной электропроводности собственных полупроводников, полупроводников n -типа и p -типа, проводящих материалов и диэлектриков; исключение операции пространственного инвертирования волновода; стабилизацию вектора индукции импульсного магнитного поля; высокую точность и чувствительность измерений, которая обеспечивается путем проведения 10-50 измерений и усреднения полученных результатов, а также получение сведений о наличии примесей в материале волновода, о плотности тока в контуре волновода и т.п.

Предложенные технические решения магнитолевых измерителей удельной электропроводности отличаются от известных широкими функциональными возможностями, — измерением удельной электропроводности как собственных полупроводников, полупроводников n -типа и p -типа, так и проводников и диэлектриков, обеспечивают определение температуры волновода и температурных характеристик электропроводности материалов, одно- и двухтактные режимы работы, а также функциональную обработку полученных результатов.

Выводы

Описана сущность магнитолевых методов и средств измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов, предполагающие использование операций пространственного инвертирования двухконтурного волновода.

Установлено три разновидности магнитолевых методов измерения удельной электропроводности полупроводниковых материалов: метод, использующий пространственное инвертирование волновода (поворот его на 180° вдоль большой (продольной) оси симметрии) и организацию движения электронов только по часовой стрелке (однонаправленный процесс воздействия); метод, использующий пространственное инвертирование волновода и организацию движения электронов как по часовой, так и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, обеспечивающий удвоенную точность измерений); метод, использующий организацию движения электронов по и против часовой стрелки (двунаправленный процесс воздействия, но без пространственного инвертирования волновода. В последнем случае используется поочередное воздействие соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты на плоские контура волновода.

Показана необходимость определения и ввода в оперативную память МК значений следующих величин: U_{on} , $\overline{I_{en}}$, ΔS_o , $T_0, \dots, T_k$, $\Delta T = 5^\circ C$, Δh_n , S_n и V_n .

Установлено, что магнитолевые измерители удельной электропроводности обеспечивают измерения не только удельной электропроводности собственных полупроводников, полупроводников n -типа и p -типа при разных направлениях движения электронов в замкнутом контуре волновода, но и плотности тока в нем, а также определить количество электронов в 1 м^3 исследуемого материала.

Констатируется, что базовым функциональным элементом магнитолевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов является генератор «пачек» импульсов высокой частоты, обеспечивающий получение соленоидального импульсного магнитного поля той же частоты, а также плоского двухконтурного волновода, выполненного из исследуемого материала.

Магнитолевые измерители электропроводности полупроводниковых материалов имеют широкие функциональные возможности, поскольку обеспечивают измерение удельной электропроводности проводящих материалов и диэлектриков.

Каждый вариант схмотехнического решения магнитолевых измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов отличается от других по точности измерений, по функциональным возможностям и по простоте реализации за счет использования типовых радиоэлементов, средств измерительной и вычислительной техники.

Описанные схмотехнические решения измерителей удельной электропроводности полупроводниковых материалов расширяют наши представления и знания о новейшем направлении в метрологии — о магнитолевых методах и средствах измерений.

Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитолевая теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 4. Магнитолевые методы и измерительные преобразователи / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2018. — № 6. — С. 183–197.
2. Патент України на винахід № 119073. Магнітолевий вимірювальний перетворювач / Кондратов В.Т. — Бюл. № 8, 25.04.2019.

References

1. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitoplevaya teoriya izmerenij s ispolzovaniem yavleniya perenosa energii i informacii skvoz material ili veshstvo. Chast 4. Magnitoplevye metody i izmeritelnye preobrazovateli / V.T. Kondratov // Herald of Khmelnytskyi National University. — 2018. — № 6. — S. 183–197.
2. Patent Ukrainy na vynakhid № 119073. Mahnitoplevyy vymiryuvalny peretvoriuvach / Kondratov V.T. — Biul. № 8, 25.04.2019.

Рецензія/Peer review : 17.11.2019 р.

Надрукована/Printed : 15.01.2020

Рецензент: д.т.н., проф. Себко В.