

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 8. ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ
И СЛАБО ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой теории и методов измерений физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал. В статье изложена сущность метода косвенных измерений удельной электропроводности проводящих и слабо проводящих материалов, а также метода сравнения, основанных на новом физической принципе измерений. Описан магнитополевой измеритель удельной электропроводности, реализующий косвенный метод измерений. Показаны возможности 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. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитополевые эффекты и явления, методы и средства измерения энергии Ферми материалов в макромире.

Ключевые слова: магнитополевые методы, измерения, электроны, 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 8. MAGNETIC-FIELD METHODS FOR MEASURING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF
CONDUCTIVE AND WEAKLY CONDUCTIVE MATERIALS**

This paper is a further development of magnetic-field theory and measurement methods of physical quantities based on the phenomenon of energy and information transfer through the material. The paper describes the essence of the method of indirect measurements of specific electrical conductivity of conductive and weakly conductive materials, as well as the comparison method based on the new physical measurement principle. The magnetic-field conductivity meter, which implements an indirect measurement method, is described. The focus is on the description of the essence of the indirect measurement method, its features and functionality. It is established that a significant influence on the value of the specific electrical conductivity of a material introduces an interval of the electron free path along the closed contour of the waveguide, depending on the structure and on the value of the lattice constant of the material. It is shown that a feature of the comparison method is the use, in accordance with the classical measurement theory, of an exemplary waveguide made from a material with normalized dimensions and parameters, and also the possibility of predicting factors affecting the significant conductivity of materials. The possibilities of measuring not only conductivity, but also other physical quantities characterizing the material under study are shown: current density in the waveguide circuit, volume of the waveguide material, number of electrons in this volume, and number of electrons in 1 m^3 this material. The circuit design of a magnetic-field meter for the specific electrical conductivity of materials that implements an indirect measurement method is described. The basis of this meter is a magnetic-field measuring transducer, which differs from the ones described earlier by the inclusion of a current meter in the circuit of the waveguide. The paper is of interest to metrologists, specialists, masters and graduate students who study magnetic-field effects and phenomena, methods and means of measuring the specific electrical conductivity of materials in the macrocosm.

Keywords: magnetic-field methods, measurements, electrons, specific electrical conductivity of materials.

Введение. Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой (МП) теории измерений (ТИ) в части измерения удельной электропроводности проводящих и слабо проводящих материалов. Ниже изложена сущность метода косвенных измерений удельной электропроводности материалов, а также метода сравнения, основанные на новом физической принципе измерений. Описан магнитополевой измеритель удельной электропроводности, реализующий косвенный метод измерений.

Объектом исследований являются магнитополевые (МП) методы измерения физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал.

Предметом исследований являются магнитополевые методы измерения удельной электропроводности проводящих и слабо проводящих материалов.

По-прежнему актуальной является задача разработки и описания сущности МП методов измерений удельной электропроводности проводящих и слабо проводящих материалов и соответствующих схмотехнических решений магнитополевых измерителей (МПИ).

Результаты исследований

1. Проводниковые, диэлектрические (изоляционные) и полупроводниковые материалы как объекты исследований

Проводниковые материалы — это такие материалы, особенностью которых является наличие в их составе свободно передвигающихся заряженных частиц, которые распространены по всему объему

материала [1].

К проводниковым относятся материалы имеющие [2]: а) низкое удельное сопротивление ($10^{-6} - 10^{-3}$) Ом·см (высокую удельную электропроводность); б) (как правило) положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС); в) перекрытие зоны проводимости и валентной зоны (запрещенная зона отсутствует).

Различают два рода проводниковых материалов: проводники, обладающие проводимостью за счёт свободных электронов (1-го рода) и проводники, обладающие ионной проводимостью (2-го рода). К проводниковым материалам 1-го рода относятся чистые металлы и сплавы, а также некоторые оксиды, соли и ряд органических веществ. В качестве последних можно назвать, например, проводящие органические полимеры, эластичный полиацетилен, полипиррол, политиофен и др. Электропроводность проводников I рода не сопровождается химическими процессами, она обусловлена движением электронов.

К проводниковым материалам 2-го рода относятся электролиты (твёрдые оксидные электролиты, растворы солей, кислот, щелочей, материалы и вещества с ионным строением молекул и др.). В них прохождение тока связано с химическими процессами и обусловлено движением положительных и отрицательных ионов [3].

Все проводниковые материалы, как проводники электрического тока, характеризуются такими электрическими свойствами, как показателем сопротивления и показателем электропроводности.

Физически сопротивление возникает в результате столкновения части движущихся электронов с атомами и ионами материала (вещества).

Электропроводность — способность проводникового материала проводить электрический ток. Важным свойством проводникового материала является низкое сопротивление потоку движущихся электронов и, следовательно, высокая электропроводность.

Электропроводность материала определяется направленным движением электронов под действием внешнего электрического или импульсного магнитного поля высокой частоты. Движение электронов под действием внешней силы связано с изменением их энергии, что возможно при наличии свободных энергетических уровней валентной зоны [4].

Кроме указанных проводниковых материалов существует целая группа технических тканей и нетканых материалов, способных проводить электрический ток. Такие материалы называются токопроводящими. Их производят из особых волокон, способных проводить электричество [5]. Токопроводящие ткани используются для: обеспечения экранирующих свойств при пошиве спецодежды и защиты от электромагнитных полей; обеспечения шунтирующих свойств при пошиве спецодежды; защиты от наведенного напряжения; соединения различных электрических устройств на одежде; использования в одежде с подогревом (углеродные нити) и т.д. [5].

Измерение удельной электропроводности технических тканей и нетканых материалов является самостоятельной, особо важной и актуальной научно-технической задачей.

Диэлектрики — это такие изоляционные материалы (вещества), в которых при низких температурах отсутствуют электрические заряды. Диэлектрики имеют удельное электросопротивление ($10^9 - 10^{19}$) Ом·см и ширину запрещенной зоны более 3,0 эВ.

Диэлектрическими принято называть материалы, имеющие низкую плотность подвижных носителей заряда (ионов и электронов) [6]. В состав диэлектрических материалов входят лишь атомы нейтрального заряда и молекулы. Заряды нейтрального атома тесно связаны друг с другом и поэтому лишены возможности свободного перемещения по всему материалу.

Согласно [6], у диэлектриков энергия возбуждения для перехода электронов на уровни проводимости превосходит 5 эВ. При воздействии на диэлектрик или диэлектрический материал электрическим или импульсным магнитным полем высокой частоты в нем развивается как процесс поляризации, так и процесс сквозной электропроводности. В случаях экстремальных воздействий развитие указанных процессов может привести к потере энергии электрического поля или к пробое диэлектрика.

Электропроводность диэлектриков определяется, в основном, перемещением ионов. На концентрацию ионов оказывают влияние не только состав материала и его температура, но и облучение этого материала частицами высоких энергий.

В некоторых изоляционных материалах свободные электрические заряды присутствуют в небольших количествах. Они возникают в результате тепловых колебаний электронов. Повышение температуры изоляционного материала в некоторых случаях провоцирует отрыв электронов от ядра.

Существуют материалы, которые отличаются большим числом «оторванных» электронов, что свидетельствует об их плохих изоляционных свойствах. Измерение их удельной электропроводности также является актуальной научно-технической задачей.

Концентрация подвижных носителей заряда в полярных материалах, как правило, выше, чем в неполярных. Это связано с тем, что ионы примесей электрически взаимодействуют с дипольными моментами полярных молекул [6].

Электрические свойства изоляционных материалов определяются их способностью к поляризации. Поляризация диэлектриков — явление, связанное с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей под воздействием: а) внешнего электрического поля; б)

внешнего магнитного поля; в) внешних сил иной физической природы (механических, воздействием температуры и т.д.); г) спонтанное (самопроизвольное) проявление поляризации. Поляризацию изоляционных (диэлектрических) материалов характеризует вектор электрической поляризации, представляющий собой дипольный момент, отнесенный к единице объема диэлектрика [7].

Поляризация не изменяет суммарного заряда в любом макроскопическом объеме внутри однородного диэлектрика. Однако она сопровождается появлением на его поверхности связанных электрических зарядов с некоторой поверхностной плотностью.

Известные типы поляризации приведены ниже в таблице по данным работы [7].

Анализ показал, что в диэлектрических материалах с указанными в таблице типами поляризации электроны и другие заряженные квазичастицы присутствуют в том или ином виде. Это дает возможность предположить, что теоретически и практически возможно осуществить генерацию тока в волноводах, выполненных из диэлектрических материалов, при воздействии на них соленоидальным импульсным магнитным полем заданной высокой частоты и напряженности, в том числе модулированным по напряженности и/или частоте и по фазе. При этом для каждого диэлектрического материала должны быть известными (и что следует учитывать) их собственные резонансные частоты и даже спектры. Для решения задачи генерации тока в диэлектрических материалах предстоит огромная научно-исследовательская работа по изучению и практическому приложению явления переноса энергии и информации сквозь материал.

Таблица 1

Типы поляризации

| № п/п | Типы поляризаций | Определение |
|-------|-------------------------------|---|
| 1 | Электронная | — смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического или импульсного магнитного поля. Самая быстрая поляризация (время протекания до 10^{-15} с). Электронная поляризация не связана с потерями. |
| 2 | Ионная | — смещение узлов кристаллической решетки под действием внешнего электрического или импульсного магнитного поля, причем смещение происходит на значение, меньшее, чем значение постоянной решетки. Время протекания 10^{-13} с без потерь. |
| 3 | Дипольная (ориентационная) | — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле. |
| 4 | Электронно-релаксационная | — ориентация дефектных электронов во внешнем электрическом или импульсном магнитном поле. |
| 5 | Ионно-релаксационная | — смещение ионов, слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры, либо находящихся в междузлии. |
| 6 | Структурная | — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип поляризации. |
| 7 | Спонтанная (самопроизвольная) | — возникает в отсутствие внешнего электрического поля. |
| 8 | Резонансная | — ориентация частиц, собственные частоты колебания которых совпадают с частотами внешнего электрического или импульсного магнитного поля. |
| 9 | Миграционная | Обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованию объёмных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения. Имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия. |

Полупроводники занимают промежуточное место между диэлектриками и проводниками. Их главное отличие заключается в зависимости электропроводности от температуры и количества примесей в их составе. При этом таким материалам свойственны характеристики и диэлектрика, и проводника.

Полупроводники имеют удельное электросопротивление ($10^{-2} - 10^9$) Ом·см и ширину запрещенной зоны от 0,1 эВ до 3,0 эВ.

В полупроводниках, из-за малой ширины запрещенной зоны, возможен переход электрона из валентной зоны в зону проводимости под действием внешнего электрического поля, импульсного магнитного поля, теплового, светового, ионизирующего излучения и т.п. [4].

В общем случае удельная электропроводность полупроводникового материала может быть описана уравнением величин:

$$\sigma = N_0 q_e \mu_e \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}, \quad (1)$$

где N_0 — концентрация носителей заряда; q_e — заряд электрона; μ_e — подвижность носителей заряда, например, электронов.

Под подвижностью понимают дрейфовую скорость частицы v_d в электрическом поле напряженностью $E = 1 \text{ В/см}$:

$$\mu_e = \frac{v_d}{E} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}. \quad (2)$$

Как видно из (1), удельная электропроводность зависит от дрейфовой скорости частицы в электрическом поле, т.е. от подвижности заряженных частиц в этом поле.

Различают собственную проводимость, проводимость n -типа и проводимость p -типа. Собственная проводимость полупроводникового материала — это электропроводность, обусловленная генерацией пар носителей заряда «электрон-дырка». Согласно [4], собственная электропроводность полупроводникового материала определяется уравнением величин:

$$\sigma = q_e N_i \mu_n + q_e P_i \mu_p, \quad (3)$$

где N_i, μ_n, P_i, μ_p — концентрации и подвижности электронов и дырок, соответственно.

Удельная электропроводность полупроводников n -типа приблизительно определяется уравнением величин

$$\sigma_n \approx q_e N_i \mu_n, \quad (4)$$

а p -типа — уравнением величин

$$\sigma_p \approx q_e P_i \mu_p, \quad (5)$$

На практике удельная электропроводность образца материала определяется согласно уравнению величин [4]:

$$\sigma = h I_x / s U_0, \quad (6)$$

где h — толщина образца, м; s — площадь образца, м²; I_x — ток, протекающий через образец, А; U_0 — напряжение на образце, В. Так, например, при $h = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $s = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $I_x = 15 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, $U_0 = 0,027 \text{ В}$ получим

$$\sigma = \frac{3,0 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^{-5}}{4,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2,7 \cdot 10^{-2}} = 34 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}. \quad (7)$$

Теоретический и практический интерес представляет задача измерения удельной электропроводности проводниковых, изоляционных и полупроводниковых материалов при воздействии на них импульсным магнитным полем высокой частоты.

2. Магнитопольные методы измерения удельной электропроводности проводниковых материалов

2.1. Косвенный метод измерения

Сущность магнитопольного метода косвенных измерений удельной электропроводности материалов заключается в следующем. Во-первых, в изготовлении из исследуемого материала, удельная электропроводность которого определяется, волновода априори заданной конфигурации, строго симметричной формы, заданных размеров и качества обработки поверхности. В частности, например, в изготовлении плоского волновода в виде двухконтурной физической (механической) системы замкнутого типа, выполненного с использованием технологии лазерной резки материалов. Только в этом случае в волноводе создаются все физические (конструктивно-технологические) условия выполнения закона сохранения механической энергии и закона сохранения электромагнитной энергии. Во-вторых, в использовании идентичных катушек одинаковой по значению индуктивности ($\{L_1\} = \{L_2\} = \{L_3\} = \{L_4\} = \{L_0\}$), которые располагаются перпендикулярно площади поверхности волновода и соосно его контурам, обеспечивая, тем самым, эффективное действие закона электромагнитной индукции. В-третьих, в выполнении в заданной последовательности физических операций формирования соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты и периодическом его воздействии на свободные электроны материала. В-четвертых, в использовании нового уравнения измерений, согласно которому осуществляется вычисление значений удельной электропроводности материалов.

Рассмотрим сущность метода более подробно. Поскольку переменное магнитное поле той или иной частоты создается в катушке индуктивности переменным током соответствующей частоты, то первоначально формируется ток с заданными параметрами, например, ток прямоугольной формы (типа меандр), заданной высокой или сверхвысокой частоты ω_0 ($\{\omega_0\} \geq 2\pi \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$) и амплитуды I_m импульсов. Математически этот ток описывается уравнением величин

$$i(t) = I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (8)$$

где $k_1 = 1, k_2 = 2$; n — целое число $1, 2, 3, \dots$; I_m — амплитудное значение тока.

Следует отметить, что амплитуда импульсов может устанавливаться в широком диапазоне значений и изменяться в зависимости от вида исследуемого материала.

Полученным высокочастотным током периодически воздействуют с низкой частотой Ω на электроны, например, первого контура волновода.

Пачки импульсов тока (рис. 1) математически описываются уравнением величин

$$i_1(t) = I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1)\omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right] \cdot \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{N \rightarrow \infty} \frac{\sin(k_2 N - k_1)\Omega t}{k_2 N - k_1} \right]. \quad (9)$$

Отношение высокой частоты к низкой выбирается, как правило, равным $\{\omega_0\} / \{\Omega\} = 10^4 \dots 10^6$.

Ток (9), протекающий через высокочастотную катушку индуктивности, возбуждает в ней соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты ω_0 с энергией

$$W_{0M} = L_0 (i_1(t))^2 / k_2, \quad (10)$$

где L_0 — индуктивность катушки индуктивности, зависящей как от индуктивности, так и от частоты и амплитуды импульсов тока.

Сформированным соленоидальным импульсным магнитным полем высокой частоты действуют на электроны исследуемого материала первого контура волновода, причем под прямым углом к его поверхности. В результате происходит принудительное движение электронов вдоль замкнутого контура волновода, например, слева на право, и распространение по нему высокочастотной электромагнитной волны, создаваемой за счет поперечных колебаний электронов и передачи их энергии.

Весьма важно, чтобы между парам высокочастотных колебательных контуров были установлены тесные емкостные связи с электрическими емкостями, соответственно, первого и второго плоских контуров волновода. Эти связи должны быть максимальными, чтобы исключить погрешность формирования электродвижущей силы и преобразования ее в высокочастотное напряжение. Получение тесных емкостных связей достигается за счет установления точного значения 90-го угла между горизонтальной плоскостью поверхности волновода и осями катушек индуктивности. От этого зависит точность формирования как тока I_x в контуре волновода, так и наведенных напряжений U_{o1} и U_{o2} .

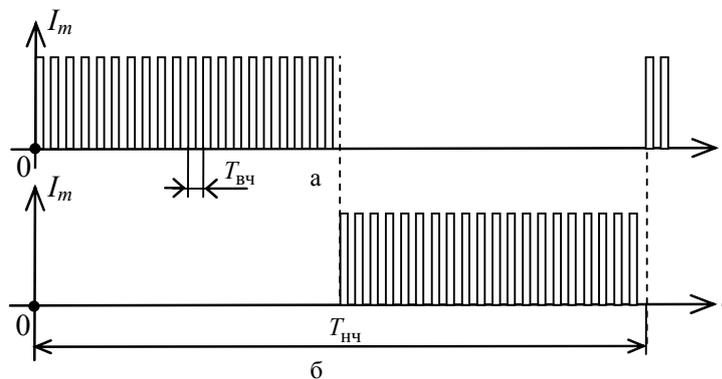


Рис. 1. Графическое изображение «пачек» высокочастотных импульсов тока прямоугольной формы (типа меандр)

В описываемом магнитопольевом методе соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты ω_0 формируется в нечетные полупериоды низкой частоты Ω следования пачек импульсов (9) (рис. 1), причем только в левой катушке индуктивности. Это обусловлено тем, что под действием каждого импульса силового магнитного поля высокой частоты электроны, расположенные в левом контуре волновода, начинают двигаться по всему замкнутому контуру волновода за счет действия на каждый из них силы Лоренца. Последняя всегда перпендикулярна вектору скорости движения электронов и других заряженных квазичастиц и не совершает работы, поскольку не меняет скорость и кинетическую энергию электронов.

Поскольку сила Лоренца действует перпендикулярно вектору скорости и направлению поля, то она создает центростремительное ускорение, т.е. изменяет направление движения электронов, не изменяя значения скорости. Поэтому электроны двигаются в магнитному поле по замкнутому кругу.

Благодаря формированию соленоидального импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты в нечетные полупериоды этой частоты, обеспечивается, при силовом действии этого поля, направленное движение электронов. В четные полупериоды (сверх)высокой частоты, т.е. при отсутствии действия магнитного поля, электроны с массой m_e движутся по инерции. Согласно второго закона Ньютона, это движение является равноускоренным, потому что, как доказано Ньютоном, ускорение пропорционально силе, вызывающей это ускорение.

Равноускоренное движение электронов сохраняется лишь на коротких участках пути (рис. 2, а,

участки $0-l_0, l_{k_2 0}-l_0, l_{k_3 0}-l_{k_2 0}$ и т.д.), ограниченных во времени четными полупериодами тока (или импульсного магнитного поля) (сверх)высокой частоты (рис. 2, б). Тогда среднее значение скорости устанавливается пропорциональным ускорению. Таким образом в волноводе формируется ток пропорциональный числу и скорости движения сорентированных электронов.

Генерируемый ток остается пропорциональным скорости в случаях, когда участки $0-l_0, l_{k_2 0}-l_0, l_{k_3 0}-l_{k_2 0}$ являются малыми и равномерными. Любая неравномерность участков приводит к нелинейности энергии, отдаваемой электронами ($mv^2/2$). В этом случае потенциалы у проводникового материала волновода станут неравномерными. Это может привести к локальному нагреву или даже перегреву проводникового материала. Равномерность распределения потенциалов является важным условием того, чтобы назвать ту или иную среду электрическим проводником.

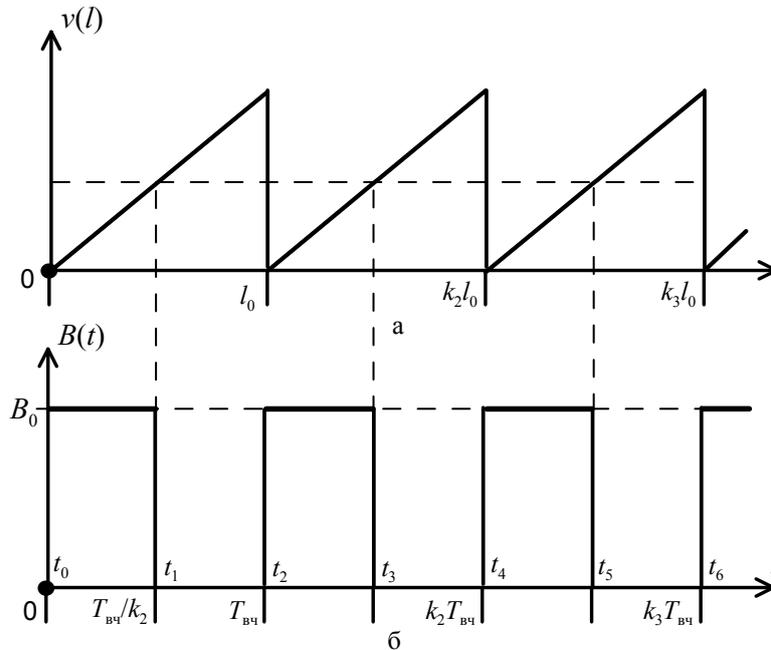


Рис. 2. Эпюры изменения средней скорости движения электронов в проводниках на коротких участках пути при действии импульсного магнитного поля (сверх)высокой частоты (типа меандр)

В металлах это условие выполняется автоматически благодаря строгой периодичности кристаллической решётки.

Сила тока в волноводе зависит от заряда q_e и концентрации N электронов, от средней скорости $\overline{v_{cp}}$ упорядоченного движения электронов, а также от площади S сечения и формы материала волновода, сквозь который течет ток. При $N = const$ и $\overline{v_{cp}} = const$

$$I_x = q_e N v_{cp} S \cos \alpha, \tag{11}$$

где α — угол между направлением скорости электронов и вектором нормали к плоской поверхности волновода.

Необходимо подчеркнуть, что ток остается пропорциональным скорости движения электронов только при условии, когда скорость периодически скидывается в нуль. Это имеет место в четные полупериоды высокочастотного тока, создающего магнитное поле (рис. 2, б). В таком случае ток через материал волновода характеризуется средней длиной $\overline{l_e}$ свободного пробега электронов, которая определяется при условии, что

$$aT_0 = k_2 v_{cp}, \text{ и } \overline{l_e} = v_{cp} T_0 = k_2 v_{cp}^2 / a \text{ или} \tag{12}$$

$$\overline{l_e} = \frac{k_2 m_e}{H q_e} \left(\frac{\gamma^*}{\sigma} \right)^2,$$

где $k_2 = 2$, H — напряженность магнитного поля, а a — ускорение, $\gamma^* = 10^6 \gamma$; γ — плотность тока, [А/м²].

Высокочастотная электромагнитная волна, возникающая при вращательно-колебательно-поступательном движении электронов по замкнутому контуру волновода, наводит во входной и выходной высокочастотных катушках индуктивности электродвижущую силу, которая трансформируется, выпрямляется, усредняется и измеряется, а полученные значения напряжений U_0 и U_x запоминаются.

Напряжение U_0 характеризует (косвенно) энергию высокочастотного магнитного поля на передающем конце волновода (в первом контуре), а напряжение U_x — энергию этого поля на приемном конце волновода (во втором контуре).

При движении по замкнутому контуру плоского волновода часть электронов теряет свою энергию за счет столкновения с атомами кристаллической решетки и с некоторыми ее электронами. Поэтому при идентичных высоко-частотных катушках индуктивности, $\{U_x\} < \{U_0\}$.

Следует отметить, что структура кристаллической решетки разных материалов отличается одна от другой и, в основном, обуславливает электропроводность того или иного материала.

Как отмечалось выше, высокочастотные колебания, которые появляются на выходах высокочастотных колебательных контуров, трансформируются. Коэффициент трансформации выбирается, как правило, равными единице. Это обеспечивает полную симметрию преобразования сигналов и повышает точность измерений напряжений U_0 и U_x .

Одновременно с измерением напряжений U_0 и U_x , измеряют действительное значение тока I_x , обусловленного движением электронов в замкнутом контуре волновода. Причем измерения осуществляются в месте наибольшей плотности электронов, т.е. в месте соединения первого и второго контуров плоского волновода проводниками, которые, как правило, выбираются нормированными по значениям площади сечения. Это необходимо для дальнейшего определения плотности тока. Для примера на рис. 3 приведены чертежи плоского двухконтурного волновода, где в разрезе A-A показаны площадь сечения $\Delta S_0 = 1\text{мм}^2$ и толщина волновода $\Delta h_0 = 1\text{мм}$.

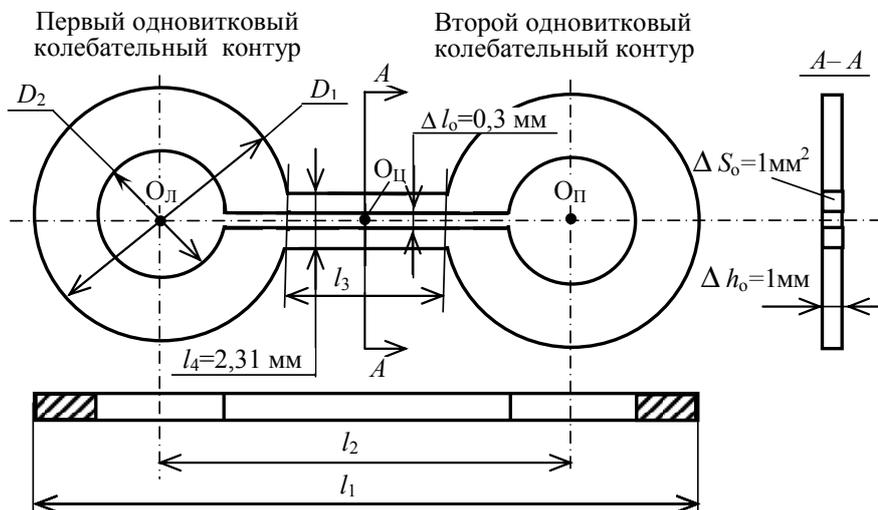


Рис. 3. Чертежи образцового плоского двухконтурного волновода

Согласно данному магнитополевого метода измерения, кроме токов и напряжений, определяется средняя длина \bar{l}_e свободного пробега электронов. Она определяется исходя из предположения, что длина свободного пробега не превышает половину периода кристаллической решетки (для проводниковых материалов с периодической структурой, т.е. при вероятности столкновения электронов с атомами кристаллической решетки равной 50%). Определение средней длины пробега электронов осуществляется согласно уравнению величин $\bar{l}_e = b / k_2$ [м], где $k_2 = 2$; b — период кристаллической решётки материала, из которого изготовлен волновод.

Об удельной электропроводности исследуемого материала судят по уравнению измерений

$$\sigma_x = \frac{I_x}{U_{x2}} \cdot \frac{1}{\bar{l}_e} \text{ См/м}. \tag{13}$$

Предположим, что в процессе измерений получены следующие результаты: $I_x = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$, $U_{x2} = 0,92 \text{ В}$ и $\bar{l}_e = b / 2 = 0,1807 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Подставим их в (13) и получим числовое значение удельной электропроводности исследуемого материала, из которого выполнен плоский двухконтурный волновод:

$$\sigma_m = \frac{1}{0,1807 \cdot 10^{-9} \text{ м}} \frac{9,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,92 \text{ В}} = \frac{9,8}{0,166} \cdot 10^6 = 59,04 \cdot 10^6 \text{ См/м} = 59,04 \text{ МСм/м}. \tag{14}$$

Дополнительно определяется значение плотности тока в контуре волновода:

$$J_x = \frac{I_x}{\Delta S_0} \left[\frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right] = \frac{9,8 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 9,8 \text{ А/м}^2 = 9,8 \text{ мА/мм}^2, \tag{15}$$

где $\Delta S_0 = 1 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ — априори заданная площадь поперечного сечения волновода (в месте разрыва контура).

Покажем возможность определения числа электронов в объеме материала волновода, а также число электронов в 1 м^3 этого материала.

Вычислим дополнительные параметры и характеристики волновода изготовленного, например, из меди. Площадь поверхности волновода определяется по его геометрическим размерам (рис. 3). Допустим $S_x = 750 \text{ мм}^2 = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Объем волновода определяется согласно уравнению измерений

$$V_x = S_x h_0 = 750 \text{ мм}^2 \cdot 1 \text{ мм} = 750 \text{ мм}^3 = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (16)$$

Предположим, что молярная масса меди $M_{Cu} = 0,0635 \text{ кг/моль}$, а плотность $\rho_{Cu} = 8,89 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Известно, что число молекул равно произведению количества вещества ν на число Авогадро N_A ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$) и определяется в соответствии с уравнением величин

$$N = \nu N_A. \quad (17)$$

С другой стороны, количество вещества ν равно отношению массы меди к ее молярной массе, т.е. $\nu = m_{Cu} / M_{Cu}$. Масса меди равна произведению плотности на объем, т.е. $m_{Cu} = \rho_{Cu} V_{Cu}$. Тогда количество вещества определяется по уравнению величин $\nu = \rho_{Cu} V_{Cu} / M_{Cu}$. Подставим V в (17) и получим уравнение величин для определения число молекул в объеме V_{Cu} плоского двухконтурного волновода в виде

$$N = N_A \frac{\rho_{Cu} V_{Cu}}{M_{Cu}}. \quad (18)$$

Поскольку число Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, $V_x = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, а плотность меди марки М00 $\rho_{Cu} = 8,94 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, то число молекул (и электронов) в исследуемом материале волновода

$$N = N_A \frac{\rho_{Cu} V_{Cu}}{M_{Cu}} = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{8,94 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{0,0635 \text{ кг/моль}} = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{8,94 \cdot 10^3 \cdot 0,75 \cdot 10^{-6}}{6,35 \cdot 10^{-2}} = 0,636 \cdot 10^{23}, \quad (19)$$

а в 1 м^3 исследуемого материала образца меди содержится

$$N = \frac{N_x}{V_{Cu}} = \frac{6,358 \cdot 10^{22}}{0,75 \cdot 10^{-6}} = 8,477 \cdot 10^{28} \text{ электронов}. \quad (20)$$

Таким образом, описанный магнитолевой метод обеспечивает измерение не только удельной электропроводности материала, из которого изготовлен плоский двухконтурный волновод, но и плотность тока в контуре волновода, объем материала волновода, число электронов в этом объеме и в 1 м^3 этого материала.

2.2. Метод сравнения

Точность измерений и функциональные возможности описанного магнитолевого (косвенного) метода определения удельной электропроводности материалов можно расширить, если использовать метод сравнения со стандартным образцом материала волновода, т.е.: 1) использовать второй плоский двухконтурный волновод, изготовленный из того же материала, но с нормированными по значениям механическими величинами; 2) дополнительно выполнить ряд операций измерения механических величин или определить их значения по результатам вычислений.

До проведения измерений проводят дополнительные работы по изготовлению двух плоских двухконтурных волноводов, — образцового и исследуемого, например, из меди. Для изготовления образцового волновода используют наилучшую по электропроводности медь, например, безкислородную листовую медь марки М00 толщиной 1 мм. Такая медь содержит 99.99% Cu, до 0.008% примесей и не более 0,001% кислорода.

Из чистого материала с минимальным количеством примесей дополнительно изготавливается стандартный

образец плоского двухконтурного волновода с нормированными по значениям параметрами: массой m_0 [кг], площадью S_0 [м²], толщиной Δh_0 [м], зазором Δl_0 [м], плотностью ρ_0 [кг/м³] и площадью сечения ΔS_0 [мм²].

Из исследуемого образца листовой меди неизвестной марки изготавливают второй (рабочий, исследуемый) идентичный по размерам и конфигурации плоский двухконтурный волновод. Как и в предыдущем случае, одним из известных методов определяют значения таких механических величин плоского двухконтурного волновода, как масса m_x [кг], площадь S_x [м²], толщина Δh_x [м], зазор Δl_x [м] между участками соединения плоских контуров волновода и плотность ρ_x [кг/м³] материала волновода и площадь сечения ΔS_0 [мм²]. Оба волновода изготавливаются по чертежам, приведенным, например, на рис. 3.

Полученные значения механических величин образцового и исследуемого волноводов сравниваются между собой, т.е. определяются неравенства: $m_x \neq m_0$ или $m_x = m_0$; $S_x \neq S_0$ или $S_x = S_0$; $\Delta h_x \neq \Delta h_0$ или $\Delta h_x = \Delta h_0$; $\Delta l_x \neq \Delta l_0$ или $\Delta l_x = \Delta l_0$; $\bar{l}_{ex} \neq \bar{l}_{e0}$ или $\bar{l}_{ex} = \bar{l}_{e0}$; $I_{x1} \neq I_{x0}$ или $I_{x1} = I_{x0}$; $U_{x2} \neq U_{02}$ или $U_{x2} = U_{02}$; $\Delta S_x = \Delta S_0$ или $\Delta S_x \neq \Delta S_0$.

С использованием стандартного образца материала волновода измеряются и запоминаются действительное значение тока I_0 , обусловленного движением электронов, и действующие значения напряжений U_{01} и U_{02} . В методе сравнения об удельной электропроводности исследуемого материала судят по уравнению величин

$$\sigma_x = \sigma_0 \frac{I_x U_{02} \bar{l}_{e0}}{I_0 U_{x2} l_e} \text{ МСМ/М} = \sigma_0 \frac{I_x U_{02} \bar{l}_{e0}}{U_{x2} I_0 l_e} \text{ МСМ/М} = \sigma_0 \frac{R_0 \bar{l}_{e0}}{R_x l_e} \text{ МСМ/М}. \quad (21)$$

При этом принимается во внимание следующее:

1) $\sigma_x = \sigma_0$ при $\bar{l}_{ex} = \bar{l}_{e0}$, $I_x = I_0$ и $U_{x2} = U_{02}$, причем ток I_x и напряжение U_{x2} обусловлены движением с заданной скоростью того же количества электронов, что и в образцовом волноводе, а также переносом энергии электронов в течении заданного времени и по тому же пути;

при $m_x \neq m_0$, $S_x = S_0$, $\Delta h_x = \Delta h_0$ и $\Delta l_x = \Delta l_0$ ток I_x обусловлен разностью масс волноводов, а значит числом электронов, напряжение U_{x2} обусловлено движением по тому же пути с заданной скоростью иного числа электронов в течении заданного интервала времени, поэтому $\sigma_x \neq \sigma_0$;

при $S_x \neq S_0$, $m_x = m_0$, $\Delta h_x = \Delta h_0$ и $\Delta l_x = \Delta l_0$ ток I_x обусловлен разностью площадей поверхностей волноводов, а напряжения U_{x2} — движением электронов с заданной скоростью по замкнутому контуру иной длины, поэтому $\sigma_x \neq \sigma_0$;

при $\Delta h_x \neq \Delta h_0$, $m_x = m_0$, $S_x = S_0$, и $\Delta l_x = \Delta l_0$ ток I_x и напряжение U_{x2} обусловлены разностью толщин материала волноводов разным числом электронов, которые движутся с заданной скоростью по замкнутому контуру, поэтому $\sigma_x \neq \sigma_0$;

при $\Delta l_x \neq \Delta l_0$, $m_x = m_0$, $S_x = S_0$ и $\Delta h_x = \Delta h_0$ ток I_x и напряжение U_{x2} обусловлены разностью (или разницей?) промежутков между элементами конструктивной ёмкости в волноводах, что приводит к изменению параметров второго контура волновода и изменению скорости движения электронов по замкнутому контуру, поэтому $\sigma_x \neq \sigma_0$;

при неидентичности (разности значений) двух и более одноименных механических величин сравниваемых волноводов, $I_x \neq I_0$ и $U_{x2} \neq U_{02}$, поэтому $\sigma_x \neq \sigma_0$.

При сравнении параметров двух волноводов, выполненных из материалов, разных по составу примесей, а значит и по структуре кристаллической решетки, длину свободного пробега электронов по замкнутому контуру исследуемого материала можно найти по уравнению величин

$$\bar{l}_e = \bar{l}_{e0} \frac{\sigma_0 I_x U_0}{\sigma_x U_x I_0}. \quad (22)$$

Определение удельной электропроводности исследуемого материала методом сравнения обеспечивает существенное повышение точности измерений. Кроме того, данный метод обеспечивает получение дополнительной информации о плотности тока в контуре волновода, о числе электронов в объеме исследуемого материала волновода и в 1 м3 этого материала, о напряженности электрического поля между крайними точками водновода, о длине пути свободного пробега электронов и т.д. Кроме того, метод сравнения обеспечивает возможность прогнозирования: какие механические величины, одна или несколько, приводят к изменениям удельной электропроводности материала, на сколько процентов и в какую сторону увеличивается или уменьшается их разность. Все это свидетельствует о широких функциональных возможностях описанного метода.

3. Магнитопольный измеритель удельной электропроводности материалов

Основу магнитопольного измерителя удельной электропроводности проводящих и слабо проводящих материалов, комбинированная схема которого приведена на рис. 4, составляет магнитопольный измерительный преобразователь, подробно описанный в работах [8, 9]. В приведенной комбинированной схеме используются следующие обозначения: КИП — кодоуправляемый источник питания; ПТК — преобразователь «ток-код»; ДВ1 и ДВ2 — двухполупериодные выпрямители; МК — микроконвертор; ЦОУ — цифровое отсчетное устройство; КЛ — клавиатура; БС1 и БС2 — ферритовые броневые сердечники; WG — плоский двухконтурный волновод; $L1, L2, L3, L4$ — многovitковые катушки индуктивности; $L5, L6$ — одновитковые плоские контура волновода; Тг — триггер; $VT1$ и $VT2$ — транзисторы; WQ — кварцевый резонатор; $R1$ и $R2$ — резисторы; $C1$ и $C2$ — конденсаторы. Все функциональные блоки и элементы соединены между собой, как показано на рис. 4.

Рассмотрим, вкратце, работу магнитопольного измерителя удельной электропроводности проводниковых материалов, реализующего метод косвенных измерений. После включения кодоуправляемого источника питания КИП, на функциональные блоки Тг, МК, ЦИУ и КЛ подается

напряжение питания. По команде, записанной в память микроконвертора МК, на цифровые входы-выходы КИП с выходов-входов порта P2 микроконвертора МК поступает цифровой сигнал, устанавливающий заданное нормированное значение напряжения на первом выходе КИП, к которому подключены первые выводы катушек индуктивности L2 и L4.

Одновременно счетный триггер Тг и ЦОУ устанавливаются в нуль. На выходе счетного триггера Тг устанавливается сигнал низкой частоты типа меандр (рис. 1). Этот сигнал формируется по программе, записанной в память МК, которая в свои нечетные полупериоды разрешает прохождение сигнала (сверх)высокой частоты с эмиттера транзистора VT1 в катушку индуктивности L2 (с одновременным усилением сигнала по току). Следует отметить, что сигнал (сверх)высокой частоты формируется с использованием кварцевого резонатора WQ на априори заданную частоту. Последний включается в схему кварцованного генератора согласно рис. 4. При смене частоты генерации кварцевый резонатор WQ заменяется другим, — с иной частотой резонанса.

Высокочастотный ток, который течёт через катушку индуктивности L2, намотанной на цилиндрическом каркасе, создает соленоидальное импульсное магнитное поле (сверх)высокой частоты. Это поле периодически воздействует на электроны контура L5 волновода WG. В результате возникает высокочастотная электромагнитная волна, распространяющаяся, как и движущиеся электроны, по замкнутому контуру волновода WG. Эта волна совместно с движущимися электронами создает высокочастотный ток. С помощью преобразователя «ток-код» ПТК осуществляется преобразование, выпрямление и усреднение высокочастотного тока с последующим измерительным преобразованием полученного постоянного тока I_x в код числа N_{I_x} и запоминанием его значения в оперативной памяти микроконвертора МК.

Высокочастотные сигналы, наводимые в катушках индуктивности L2 и L4, трансформируются в катушки индуктивности L1 и L3 соответственно. Выходные сигналы с указанных катушек индуктивности поступают, соответственно, на входы выпрямителей ДВ1 и ДВ2. На выходах выпрямителей ДВ1 и ДВ2 формируются напряжения U_o и U_x . Указанные напряжения поступают, через коммутатор каналов порта P0 на аналого-цифровой преобразователь, встроенный в микроконвертор МК.

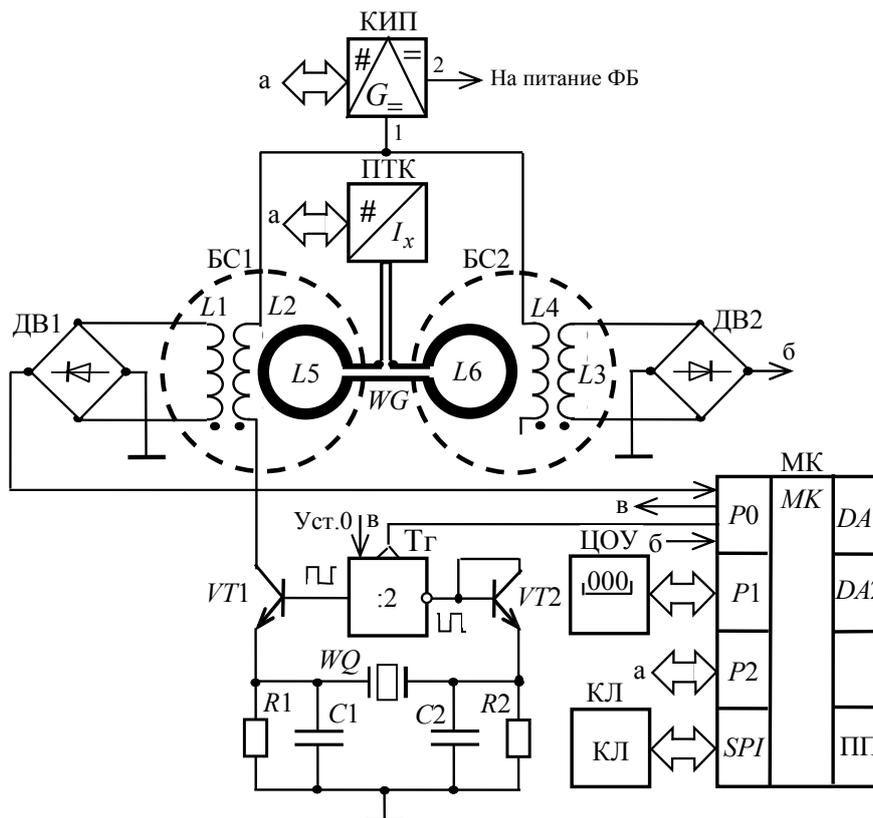


Рис. 4. Комбинированная схема магнитополевого измерителя удельной электропроводности материалов

Полученные коды чисел N_{U_o} и N_{U_x} запоминаются в оперативном запоминающем устройстве микроконвертора МК.

При необходимости, с помощью клавиатуры КЛ устанавливается значение низкой частоты, необходимое для формирования пачек импульсов в определенном диапазоне значений частот.

После завершения процесса измерений, по программе, записанной в микроконвертор МК, осуществляется обработка полученных результатов. Как правило, справочные данные о значениях механических величин априори заносятся в память МК. В случае замены образцового плоского двухконтурного волновода WG на другой, выполненный, например, из другого материала, новые исходные

данные заносятся в память МК с помощью клавиатуры КЛ.

Полученные результаты вычислений обрабатываются и отображаются на экране ЦОУ, подключенного к порту P1 МК.

При измерениях были получены, например, следующие результаты: $N_{I_x} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$, $N_{U_x} = 0,92 \text{ В}$ и $N_{\bar{l}_e} = 0,1807 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Об удельной электропроводности исследуемого материала судят по уравнению величин (13). Последнее может быть записано в виде уравнение числовых значений

$$N_{\sigma_x} = \frac{N_{I_x}}{N_{U_x}} \cdot \frac{1}{N_{\bar{l}_e}}. \quad (23)$$

Подставив результаты измерений в (23), получим следующее значение удельной электропроводности исследуемого образца меди:

$$N_{\sigma_x} = \frac{9,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}}{0,92 \text{ В}} \frac{1}{0,1807 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = \frac{9,8}{0,166} \cdot 10^6 = 59,04 \cdot 10^6 \text{ См/м} = 59,04 \text{ МСм/м}. \quad (24)$$

Описанное техническое решение магнитополевого измерителя имеет достаточно высокую точность измерения удельной электропроводности материалов, поскольку определяется, прежде всего, точностью измерения тока и напряжения приборами определенного (выбранного) класса точности.

Данное техническое решение может быть использовано при измерениях удельной электропроводности любого проводящего или слабо проводящего материала при условии, что из него возможно изготовление плоского двухконтурного волновода заданной конфигурации и размеров.

Магнитолевой измеритель, реализующий косвенный метод измерения, имеет расширенные функциональные возможности в части измерения не только удельной электропроводности материалов, но и плотности тока, напряженности электрического поля в материале, длину свободного пробега электронов и т.д. Для реализации метода сравнения в магнитолевом измерителе все измерительно-преобразовательные операции осуществляются для двух волноводов, изготовленных из исследуемого и образцового материалов.

Выводы

1. Существующие бесконтактные измерители удельной электропроводности материалов основаны на использовании вихревых токов в исследуемом металле. При измерениях слабопроводящих материалов они не обеспечивают высокую точность измерений.

2. Есть все основания полагать, что магнитолевые методы могут использоваться не только для определения удельной электропроводности проводниковых материалов 1-го рода, но и материалов 2-го рода благодаря их периодической структуре.

3. Измерение удельной электропроводности многих диэлектрических (изоляционных) материалов магнитолевым методом возможно, поскольку при воздействии на эти материалы электрическим или импульсным магнитным полем высокой частоты, в них развивается как процесс поляризации, так и процесс сквозной электропроводности.

4. Удельная электропроводность материала зависит от дрейфовой скорости заряженной частицы в электрическом поле, т.е. от их подвижности.

5. Измерение удельной электропроводности полупроводниковых материалов магнитолевым методом не сложно, но требует реализацию операции пространственного инвертирования полупроводникового материала, из которого выполнен волновод.

6. В основу косвенного метода определения удельной электропроводности материала положено измерения силы токов, протекающих сквозь материал волновода, и напряжений, наведенных в высокочастотных контурах, связанных с исследуемым материалом, в результате действия на его заряженные квазичастицы соленоидальным импульсным магнитным полем высокой или сверхвысокой частоты. Ограничением является невозможность изготовления плоского двухконтурного волновода из исследуемого материала (вещества).

7. Метод сравнения основан на измерениях токов и напряжений двух волноводов, изготовленных из исследуемого и образцового материалов.

8. Генерируемый в замкнутом контуре волновода высокочастотный ток пропорционален скорости движения электронов только при условии, когда скорость периодически сбрасывается в нуль, а ток может быть охарактеризован средней длиной свободного пробега электронов.

9. При движении по замкнутому контуру плоского волновода часть электронов теряет свою энергию за счет столкновения с атомами кристаллической решетки и с некоторыми ее электронами. Это является причиной, ограничивающей электропроводность исследуемого материала.

10. Средняя длина свободного пробега электронов определяется исходя из предположения, что она не превышает половины периода кристаллической решетки материала волновода, т.е. предполагается, что вероятность столкновения электронов с атомами кристаллической решетки не превышает 50%.

Метод сравнения обеспечивает возможность устанавливать, какие механические величины приводят к изменениям удельной электропроводности материала, на сколько процентов и в какую сторону увеличивается или уменьшается удельная электропроводность материала.

11. Описанные магнитолевые методы характеризуются высокой точностью измерений и

широкими функціональними можливостями. Эти методы обеспечивают получение дополнительной информации о плотности тока в контуре волновода, о числе электронов в объеме исследуемого материала волновода и в 1 м³ этого материала, о напряженности электрического поля между крайними точками волновода, о длине пути свободного пробега электронов и т.д.

12. В основу технической реализации магнитопольного измерителя удельной электропроводности материала, реализующего косвенный метод измерения, положено техническое решение магнитопольного измерительного преобразователя, описанного в более ранних работах автора.

13. Целесообразно распространение описанных магнитопольных методов измерений и соответствующих технических решений для широкого класса материалов.

14. Есть основания полагать, что теоретически и практически возможно осуществить генерацию тока в волноводах, выполненных из диэлектрических материалов при воздействии на их заряженные квазичастицы соленоидальными импульсными магнитными полями высокой частоты. Для этого следует более глубоко изучить явление переноса энергии и информации сквозь диэлектрический материал.

Литература

1. Что такое проводник и диэлектрик? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.elektro.ru/articles/detail/chto-takoe-provodnik-i-dielektrik>.

2. Проводниковые материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://electronics.fandom.com/ru/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B.

3. Проводники первого и второго рода [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fis.wikireading.ru/1590>.

4. Лабораторная работа № 26. Исследование электропроводности полупроводниковых материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studylib.ru/doc/310234/issledovanie-e-lektroprovodnosti-poluprovodnikovyh>.

5. Технические ткани и материалы, имеющие токопроводящие свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://energo.term.org/products/tehnicheskie_tkani_i_materialyi_imeyushchie_tokoprovodyaschie_svoystva.

6. Электропроводность диэлектриков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/302/index.html>.

7. Поляризация диэлектриков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2.

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. Патент України на винахід № 119073. Магнітопольний вимірювальний перетворювач / Кондратов В.Т. Бюл. № 8, 25.04.2019.

References

1. Chto takoe provodnik i dielektrik? [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://www.elektro.ru/articles/detail/chto-takoe-provodnik-i-dielektrik>.

2. Provodnikovye materialy [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://electronics.fandom.com/ru/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B.

3. Provodniki pervogo i vtorogo roda [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://fis.wikireading.ru/1590>.

4. Laboratornaya rabota № 26. Issledovanie elektroprovodnosti poluprovodnikovyh materialov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://studylib.ru/doc/310234/issledovanie-e-lektroprovodnosti-poluprovodnikovyh>.

5. Tehnicheskie tkani i materialy, imeyushchie tokoprovodyashie svoystva [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://energo.term.org/products/tehnicheskie_tkani_i_materialyi_imeyushchie_tokoprovodyaschie_svoystva.

6. Elektroprovodnost dielektrikov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.heuristic.su/effects/catalog/est/byId/description/302/index.html>.

7. Polyarizaciya dielektrikov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%B8%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2.

8. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmereniy 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. Patent Ukrainy na vynakhid № 119073. Mahnitopolevyi vymiryuvalniy peretvoriuvach / Kondratov V.T. Biul. № 8, 25.04.2019.

Рецензія/Peer review : 9.06.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Рецензент: д.т.н. В.А. Вишинський