

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.7

УДК 537.874; 537.624

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГРАФЕНОСОДЕРЖАЩЕГО ШУНГИТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТРУБОК ТОКА

И. В. Антонец¹, Е. А. Голубев², В. Г. Шавров³, В. И. Щеглов³

¹ Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, 167001, Сыктывкар, Октябрьский пр-т, 55

² Институт геологии Коми НЦ Уро РАН, 167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2020 г.

Аннотация. Выполнено представление удельной проводимости графеносодержащего шунгита на основе модели трубок тока. Отмечено, что реальные образцы природного шунгита представляют собой совокупность областей хорошо проводящего углерода, разделенных областями непроводящего кварца. Установлено, что области углерода состоят из наноразмерных блоков, структура которых образована графеновыми слоями, сгруппированными в многослойные пачки. Для анализа проводимости таких блоков предложена модель трубок, состоящих из графеновых пачек, упорядоченных по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Предполагается, что электрический ток через блок может проходить только по трем взаимно перпендикулярным направлениям, совпадающим с направлениями трубок. В качестве входных геометрических параметров задачи представлены размеры слоя графена, размеры пачки и промежутка между слоями графена внутри пачки, размеры промежутка между пачками внутри трубки, а также размеры промежутков между трубками внутри блока. В качестве входных электрических параметров задачи представлены удельные сопротивления слоя графена вдоль и поперек плоскости, а также удельные сопротивления промежутков между пачками и между трубками, которые предполагаются изотропными. Рассмотрено продольное и поперечное сопротивления одного слоя графена, а также пачки, образованной несколькими

слоями графена, разделенными промежутками. Показано, что сопротивление пачки вдоль слоя графена определяется параллельным соединением сопротивлений слоев графена и промежутков между ними, а сопротивление пачки поперек слоя графена определяется последовательным соединением сопротивлений слоев и промежутков. На основе рассмотрения геометрии и электрических параметров трубки показано, что сопротивление трубки формируется последовательным соединением сопротивлений пачек и промежутков между ними. На основе рассмотрения геометрических и электрических параметров блока показано, что его сопротивление формируется параллельным соединением сопротивлений трубок и промежутков между ними. Приведены алгоритмы определения абсолютного и удельного сопротивления блока по трем координатам, состоящие в последовательности шагов расчета промежуточных параметров на основе заданных входных параметров задачи в целом. Выполнен расчет абсолютного и удельного сопротивления блока при частном наборе входных параметров, наиболее близко соответствующих известным из эксперимента реальным параметрам шунгита. Показано, что при известном из эксперимента различии сопротивлений вдоль и поперек слоя графена на четыре порядка, различие сопротивлений блока вдоль тех же направлений составляет не более одного порядка. В качестве причины уменьшения анизотропии сопротивления блока по сравнению с анизотропией слоя графена, отмечена роль изотропного характера сопротивлений промежутков между пачками и трубками внутри блока. Рассмотрены зависимости абсолютного и удельного сопротивлений блока от его геометрических размеров. Показано, что абсолютное значение сопротивления блока вдоль той или иной оси прямо пропорционально его размеру вдоль той же оси. Показано, что удельное сопротивление блока вдоль каждой из осей при малых размерах блока определяется удельными сопротивлениями слоя графена и пачки, а при больших размерах блока не меняется, принимая постоянное значение. Показано, что для получения объективного значения удельного сопротивления размер блока должен превышать размер пачки по всем координатам не менее чем на порядок. Отмечена некоторая недостаточность

экспериментальных данных на уровне наноразмеров, вынуждая вместо точных значений параметров использовать лишь наиболее вероятные их величины. Показано, что, несмотря на вероятностный характер задаваемых параметров, получаемое удельное сопротивление блока в целом согласуется с известными из эксперимента удельными сопротивлениями углеродной составляющей шунгита в пределах около 20%.

Ключевые слова: углерод, шунгит, электрическая проводимость.

Abstract. The presentation of electrical conductivity of graphene-containing shungite on the basis of current tubes model is executed. It is established that the real shungite specimens represent the combination from the region of well conducting carbon which are divided by regions of bad conducting quarts. It is established that the carbon regions consist of nano-dimensions blocks which have the structure organized from graphene slides which are grouped to multi-layer packets. For the analysis of conductivity of these blocks it is proposed the model of tubes which consist of graphene packets which are regulated along three mutual perpendicular directions. It is supposed that electrical current through the block is able to propagate only along three mutual perpendicular directions which are coincide with the tube directions. As an initial incoming geometrical parameters of the task it is proposed the dimensions of graphene slide, the dimensions of packet and intervals between graphene slides inside of packet and also the dimensions of intervals between the packets inside the tubes and the dimensions of intervals between the tubes inside of block. As an incoming electrical parameters of the task it is proposed the specific resistance of graphene slide along and across of its flatness and specific resistance of intervals between the packets and between the tubes which are supposed as isotropic. It is investigated the longitudinal and transverse resistance of single graphene slide and also the same for packet which consist of several graphene slides which are separated by some intervals. It is shown that the resistance of packet along the graphene slide is determined by parallel connection of resistances both graphene slides and intervals between its and the resistance of packet across the graphene slides is determined by the successive connection of slides and intervals. On the basis of investigation of geometrical and electrical parameters of tube it is shown that the resistance of tube is

formed by successive connection of resistances of packets and intervals between its. On the basis of investigation of geometrical and electrical parameters of block it is shown that its resistance is formed by the parallel connection of resistances of tubes and intervals between its. It is proposed the algorithms of determination of absolute and specific resistances of block along three coordinate axis. This algorithms are consisted of succession of steps of calculation intermediate parameters on the basis of determined initial parameters of task in whole. It is executed the calculation of absolute and specific resistances of block which is the most approximated to known from experiment parameters of shungite. It is shown that by determined from experiment distinction of resistance along and across the graphene slide to four orders the distinction of resistance of block as a whole along those directions is not more than unit order. As a reason of decreasing of anisotropy of block as a whole in comparison with the anisotropy of graphene slide, the role of isotropic character of resistance of intervals between the tubes inside of block is established. The dependencies of absolute and specific resistance of block from its geometrical dimensions are investigated. It is shown that the absolute value of resistance of block along the so and other axis is straight proportional to its dimension along the same axis. It is shown that the specific resistance of block along each from axis by the little dimensions of block is determined by specific resistance of graphene slide and packet and by the large dimensions of block its specific resistance is not changed and accept to the constant value. It is shown that for the obtaining of objective significance of specific resistance the dimension of block must to exceed the dimension of graphene packet not less than one order. Some insufficiency of experimental data at the nanoscale level is noted, forcing instead of exact parameter values to use only their most probable values. It is shown that, in spite of the probabilistic character of the initial incoming parameters, the calculated resistivity of the block as a whole is consistent with the resistivity of shungite known from the experiment within about 20%.

Key words: carbon, shungite, electro-conductivity.

Введение

Задача создания планарных структур и поверхностей произвольной формы, надежно экранирующих электромагнитное излучение, представляет значительный интерес для современной электро и радиотехники [1-4]. Распространенным подходом к решению этой задачи является использование метаматериалов, представляющих собой наборные структуры из проводящих элементов малого размера, упорядоченных определенным образом [5-8]. Важной альтернативой здесь можно считать использование природного материала – шунгита, высокая структурированность, широкая доступность и низкая стоимость которого позволяет создавать покрытия весьма большой площади [9-12].

По происхождению шунгит представляет собой подобную каменному углю горную породу, геологический возраст которой составляет порядка двух миллиардов лет. В генезисе своего образования шунгит содержит нефть, в отличие от сходных пород, таких как антрацит и графит, имеющих в своем происхождении торф. Значительные залежи шунгита находятся на Карельском перешейке, Новой Земле и в других областях приполярной зоны России [13-17].

Высокая экранирующая способность шунгита, как для низкочастотного, так и СВЧ излучения вплоть до десятков ГГц и выше [9-12, 18-30] обусловлена разветвленной сетью слоев углерода, разделенных прослойками кварца. Структура шунгита содержит слои графена, сформированные в виде многослойных пачек, замкнутых глобул и протяженных перевивающихся лент [31-43]. Существенная роль слоев графена в проводящих и поглощающих свойствах материала отмечена в работах [44-47].

В общем случае проводящий углерод внутри шунгита представлен в виде хаотически распределенных более или менее однородных пространственных областей с характерными размерами порядка единиц и десятков микрометров [31-35]. Эти области перемежаются другими областями, тех же размеров, состоящими из кварца, то есть непроводящими. Суммарная проводимость образца в целом обусловлена в первую очередь относительным количеством

углеродных областей, то есть содержанием углерода в шунгите. Другим важнейшим параметром, определяющим проводимость, является относительная пространственная протяженность областей углерода. Подробный расчет проводимости с учетом обоих этих обстоятельств, выполненный на основе анализа карт проводимости, полученных методом электросиловой микроскопии, представлен в работах [47-50].

Области углерода в шунгите образованы на основе слоев графена, собранных в пачки, которые, как правило, образуют протяженные слои и даже ленты, иногда формирующие закрытые образования в виде глобул [31]. Подробное исследование структуры шунгита на уровне графеновых пачек требует применения электронной микроскопии [31, 51]. Наиболее распространенным видом микроструктуры шунгита является многослойная или «многоэтажная» пачечная структура, ориентация отдельных пачек внутри которой придерживается единого направления, так что плоскости образующих пачки графеновых слоев выдерживаются параллельными друг другу на расстоянии многих десятков и сотен пачек [26-стр.12-29]. Сопротивление такой структуры является сильно анизотропным из-за того, что проводимость слоя графена вдоль плоскости велика, а поперек плоскости мала, причем различие таких проводимостей достигает трех-четырёх порядков [52].

При высоком содержании углерода пачки могут образовывать непрерывные цепи, протяженность которых достигает десятков микрометров. Если пачки непосредственно соединяются друг с другом, получается слоистая структура с весьма высокой продольной проводимостью. Такой структурой обладает природный и искусственный графит, находящий широкое применение в электротехнике [52]. В случае шунгита пачки следуют друг за другом с некоторыми промежутками, внутри которых геометрическая правильность слоев графена нарушается. То есть цепочка из пачек получается имеющей периодические вставки, сопротивление которых несколько превышает сопротивление самих пачек.

Из цитированной литературы можно видеть, что информация о микроструктуре шунгита имеет довольно широко разработанный характер. В то же время, попытки расчета проводимости подобных структур весьма немногочисленны, что обусловлено крайне высокой их сложностью.

Тем не менее, из всего разнообразия структур можно выделить определенные формы, расчет проводимости которых можно выполнить более или менее приемлемыми методами. К числу таких структур следует отнести упомянутые выше цепочки из пачек, разделенных промежутками. Можно полагать, что протекание электрического тока внутри шунгита происходит именно вдоль таких цепочек, что обусловлено их определенной упорядоченностью и высокой проводимостью слоев графена, расположенных вдоль пачек. То есть можно говорить об определенных трубках тока, структура которых повторяет структуру цепочек.

Настоящая работа посвящена расчету проводимости шунгита на основе именно такой модели трубок тока, повторяющих структуру цепочек из графеновых пачек.

1. Основные положения модели трубок тока

В общем случае структура шунгита представляет собой перемежающиеся области хорошо проводящего углерода и плохо или совсем не проводящего кварца [24]. При этом взаимное соотношение суммарных объемов углеродных областей и областей кварца определяет концентрацию или удельное содержание углерода в образце в целом. При этом углеродные области являются более или менее однородными и их размер составляет единицы и десятки микрометров. То есть можно считать, что углерод в шунгите распределен в виде достаточно однородных блоков того же или меньшего размера, причем в пределах углеродных областей такие блоки непосредственно примыкают друг к другу или разделены сравнительно небольшими промежутками.

Модель трубок тока предполагает расчет проводимости именно таких блоков, состоящих из углерода без примеси или с незначительной примесью

кварца. После того, как проводимость блоков будет рассчитана, дальнейшую оценку проводимости образца шунгита в целом с учетом концентрации углерода можно произвести в раках модели углеродных цепочек, подробно рассмотренных в работах [48-50]. Настоящая работа будет касаться расчета проводимости только блоков, состоящих преимущественно из углерода.

В основу модели трубок тока положим предположение, что ток течет только по трубкам, не ответвляясь и не переходя с одной трубки на другую, то есть так, как будто бы они были изолированы друг от друга. Будем полагать, что трубки являются прямыми и проходят непрерывно от одной поверхности блока до другой, сохраняют поперечное сечение по всей длине и состоят из графеновых пачек, следующих друг за другом.

Блок – прямоугольный параллелепипед. Оси трубок параллельны ребрам параллелепипеда. Весь объем блока заполнен трубками только одного направления. Будем полагать, что ток на блок подается через пару виртуальных контактов, прилежащих к взаимно противоположным поверхностям блока. Каждый из контактов занимает всю площадь той поверхности блока, к которой он приложен.

Основная задача – выразить сопротивление блока через геометрические и электрические параметры трубок, графеновых пачек и слоев графена.

2. Основные обозначения

Приведем сначала главные используемые далее обозначения.

Геометрические параметры:

G – слой графена;

B – промежуток между двумя слоями графена внутри одной пачки;

P – пачка;

T – трубка;

D – промежуток между двумя соседними пачками;

H – промежуток между трубками;

S – блок в целом.

Система координат – $Oxuz$:

Плоскости слоев графена совпадают с плоскостью Oxy . Пачки – прямоугольные параллелепипеды, плоскости которых совпадают с координатными плоскостями. Трубки ориентированы вдоль той или иной из осей системы координат. Плоскости блока совпадают с плоскостями системы координат;

Слой графена – прямоугольный параллелепипед, ребра которого совпадают с осями Ox , Oy , Oz , а большая плоскость параллельна плоскости Oxy .

Пачка – состоит из одинаковых прямоугольных слоев графена, наложенных точно друг на друга с одинаковыми промежутками в направлении оси Oz , перпендикулярной плоскости слоя графена, так что по образующей пачка представляет собой прямоугольный параллелепипед, плоскости которого совпадают с плоскостями системы координат.

Трубка состоит из одинаковых пачек, плоскости которых ориентированы вдоль плоскостей системы координат, а сами пачки следуют друг за другом с промежутками вдоль осей Ox , Oy , Oz , причем промежутки между пачками вдоль каждой из этих осей, сохраняются в пределах данной оси, но для различных осей между собой могут различаться.

Блок состоит из набора одинаковых параллельных трубок, расставленных по правильной прямоугольной сетке с одинаковыми промежутками вдоль трех взаимно перпендикулярных осей, совпадающих с осями координат Ox , Oy , Oz и ориентированных перпендикулярно осям трубок, причем промежутки между трубками вдоль каждой из этих осей, сохраняются в пределах данной оси, но для различных осей между собой могут различаться.

Обозначения параметров по осям Ox , Oy , Oz , используемые в приведенных далее формулах:

ρ_{Gx} , ρ_{Gy} , ρ_{Gz} – удельные сопротивления слоя графена;

ρ_{Bx} , ρ_{By} , ρ_{Bz} – удельные сопротивления промежутков между слоями

графена;

$\rho_{Dx}, \rho_{Dy}, \rho_{Dz}$ – удельные сопротивления промежутков между

пачками;

R_{Gx}, R_{Gy}, R_{Gz} – абсолютные сопротивления слоя графена;

R_{Bx}, R_{By}, R_{Bz} – абсолютные сопротивления промежутка между слоями

графена;

R_{Px}, R_{Py}, R_{Pz} – абсолютные сопротивления пачки;

R_{Dx}, R_{Dy}, R_{Dz} – абсолютные сопротивления промежутков между

пачками;

R_{Tx}, R_{Ty}, R_{Tz} – абсолютные сопротивления трубки;

R_{Hx}, R_{Hy}, R_{Hz} – абсолютные сопротивления промежутков между

трубками;

N_{Px}, N_{Py}, N_{Pz} – количества слоев в пачке;

$N_{TPx}, N_{TPy}, N_{TPz}$ – количества пачек в трубке;

$N_{TDx}, N_{TDy}, N_{TDz}$ – количества промежутков в трубке;

$N_{STx}, N_{STy}, N_{STz}$ – количества трубок в блоке;

$N_{SHx}, N_{SHy}, N_{SHz}$ – количества промежутков между трубками в блоке;

R_{Sx}, R_{Sy}, R_{Sz} – полные сопротивления блока;

$\rho_{Sx}, \rho_{Sy}, \rho_{Sz}$ – удельные сопротивления блока.

3. Общие формулы для получения сопротивлений

В рамках настоящей работы будут неоднократно встречаться схемы соединения сопротивлений в различных вариантах. Приведем их краткую сводку. Для нахождения абсолютных сопротивлений будем пользоваться формулой для протяженного образца в форме цилиндра постоянного сечения [53, 54]:

$$R = \frac{\rho L}{S}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление; L – длина образца; S – площадь поперечного сечения образца.

В рассматриваемой задаче все объемные элементы структуры имеют форму прямоугольных параллелепипедов, поэтому L – размер образца, вдоль которого идет ток, а S – площадь грани параллелепипеда, перпендикулярной направлению тока. Если известно сопротивление R прямоугольного параллелепипеда по оси, вдоль которой идет ток, то удельное сопротивление ρ вдоль этой оси определяется по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{L}, \quad (2)$$

где L – размер образца, вдоль которого идет ток, а S – площадь грани параллелепипеда, перпендикулярной направлению тока.

При параллельном соединении сопротивлений будем пользоваться формулой [53, 54]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (3)$$

откуда:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4)$$

При последовательном соединении сопротивлений будем пользоваться формулой [53, 54]:

$$R = R_1 + R_2. \quad (5)$$

4. Один слой графена

Рассматриваемый углеродосодержащий блок образован пачками, которые представляют собой стопки из слоев графена. Поэтому сначала рассмотрим

резистивные характеристики одного такого слоя. Геометрия слоя графена показана на рис.1.

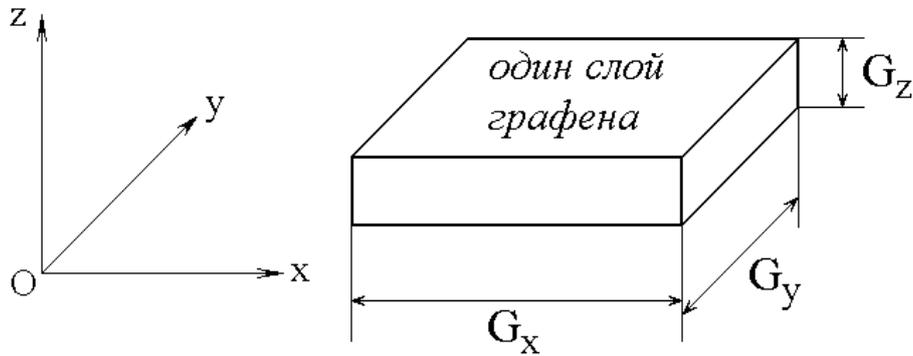


Рис.1. Схема геометрических параметров и ориентации системы координат для одного слоя графена.

Слой графена ориентирован в плоскости Oxy . Будем считать заданными геометрические размеры слоя по трем координатам: G_x , G_y , G_z , а также соответствующие удельные сопротивления: ρ_{G_x} , ρ_{G_y} , ρ_{G_z} . Пользуясь формулой (1), находим сопротивления слоя графена по осям:

$$R_{G_x} = \frac{\rho_{G_x} G_x}{G_y G_z}; \quad (6)$$

$$R_{G_y} = \frac{\rho_{G_y} G_y}{G_z G_x}; \quad (7)$$

$$R_{G_z} = \frac{\rho_{G_z} G_z}{G_x G_y}. \quad (8)$$

5. Пачка из нескольких слоев графена

Рассмотрим теперь пачку в целом. Соответствующая геометрия показана на рис.2.

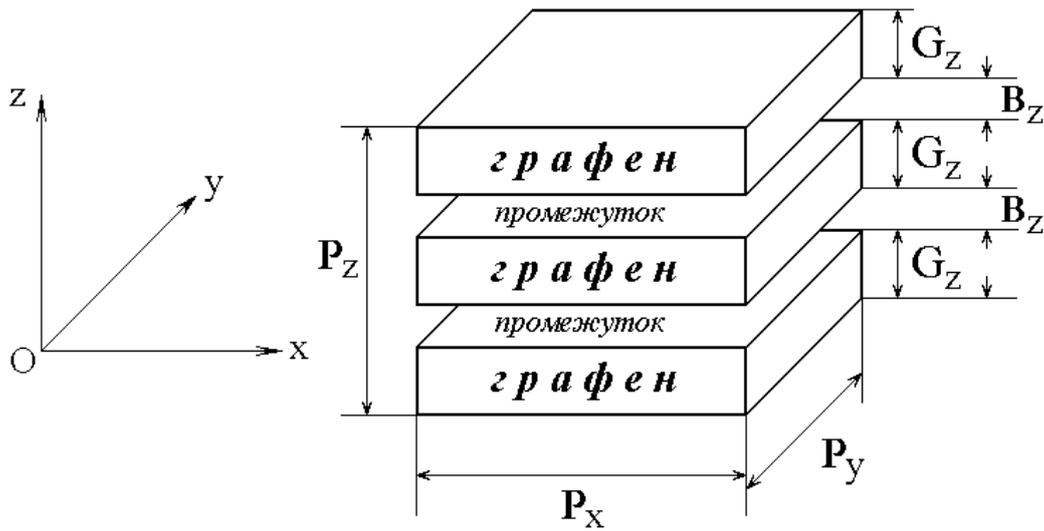


Рис.2. Схема геометрических параметров и ориентации системы координат для одной графеновой пачки. Число слоев – условное.

Из рисунка видно, что кроме слоев графена пачка содержит промежутки между этими слоями. Будем считать заданными геометрические размеры промежутка между двумя слоями графена по трем координатам: B_x , B_y , B_z , а также соответствующие удельные сопротивления: ρ_{Bx} , ρ_{By} , ρ_{Bz} .

При этом, опять таки по формуле (1), получаем сопротивления промежутка по осям:

$$R_{Bx} = \frac{\rho_{Bx} B_x}{B_y B_z}; \quad (9)$$

$$R_{By} = \frac{\rho_{By} B_y}{B_z B_x}; \quad (10)$$

$$R_{Bz} = \frac{\rho_{Bz} B_z}{B_x B_y}. \quad (11)$$

Пачка образована слоями одинакового размера, лежащими точно друг под другом, так что:

$$B_x = G_x; \quad (12)$$

$$B_y = G_y. \quad (13)$$

При этом формулы (9)-(11) принимают вид:

$$R_{Bx} = \frac{\rho_{Bx} G_x}{G_y B_z}; \quad (14)$$

$$R_{By} = \frac{\rho_{By} G_y}{B_z G_x}; \quad (15)$$

$$R_{Bz} = \frac{\rho_{Bz} B_z}{G_x G_y}. \quad (16)$$

Рассмотрим теперь пачку как целое. Будем считать заданным размер пачки вдоль оси Oz , равный P_z . Размеры пачки по осям Ox и Oy определяются размерами слоя графена по этим осям:

$$P_x = G_x; \quad (17)$$

$$P_y = G_y. \quad (18)$$

Размер пачки по оси Oz складывается из составляющих ее размеров слоев графена и промежутков. Предположим, что пачка содержит N_{Pz} слоев графена. Поскольку слои графена чередуются с промежутками, то она содержит $N_{Pz} - 1$ промежутков.

Таким образом, полный размер пачки по оси Oz равен:

$$P_z = N_{Pz} G_z + (N_{Pz} - 1) B_z. \quad (19)$$

Из этого выражения находим число слоев графена в пачке:

$$N_{Pz} = \frac{P_z + B_z}{G_z + B_z}. \quad (20)$$

Рассмотрим теперь сопротивления пачки как целого по осям. Эти сопротивления вдоль осей Ox и Oy формируются параллельным соединением сопротивлений слоев графена и промежутков по этим осям, а вдоль оси Oz – последовательным соединением сопротивлений слоев графена и промежутков по этой оси. Будем считать известным число слоев в пачке N_{Pz} , определенное

в соответствии с формулой (20). Получаем сопротивление пачки по оси Ox – как сопротивление параллельно соединенных N_{Pz} слоев и $N_{Pz} - 1$ промежутков.

Сопротивление параллельно соединенных N_{Pz} слоев:

$$\Sigma(R_{Gx}) = \frac{R_{Gx}}{N_{Pz}}. \quad (21)$$

Сопротивление параллельно соединенных $N_{Pz} - 1$ промежутков:

$$\Sigma(R_{Bx}) = \frac{R_{Bx}}{N_{Pz} - 1}. \quad (22)$$

Эти сопротивления в единой пачке также соединены параллельно. По правилам параллельного соединения (4) получаем обратную величину сопротивления пачки в целом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{Px}} &= \frac{1}{\Sigma(R_{Gx})} + \frac{1}{\Sigma(R_{Bx})} = \frac{N_{Pz}}{R_{Gx}} + \frac{N_{Pz} - 1}{R_{Bx}} = \\ &= \frac{N_{Pz}R_{Bx} + (N_{Pz} - 1)R_{Gx}}{R_{Gx}R_{Bx}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Обращая это выражение, получаем сопротивление пачки вдоль оси Ox в виде:

$$R_{Px} = \frac{R_{Gx}R_{Bx}}{N_{Pz}R_{Bx} + (N_{Pz} - 1)R_{Gx}}. \quad (24)$$

Сопротивление пачки вдоль оси Oy имеет тот же вид с заменой x на y :

$$R_{Py} = \frac{R_{Gy}R_{By}}{N_{Pz}R_{By} + (N_{Pz} - 1)R_{Gy}}. \quad (25)$$

Сопротивление пачки вдоль оси Oz составляется из последовательно соединенных сопротивлений N_{Pz} слоев графена и $N_{Pz} - 1$ промежутков, где оба вида сопротивлений берутся по оси Oz :

$$R_{Pz} = N_{Pz}R_{Gz} + (N_{Pz} - 1)R_{Bz}. \quad (26)$$

В формулах (24)-(26) величины R_{Gx} , R_{Gy} , R_{Gz} и R_{Bx} , R_{By} , R_{Bz} определяются формулами (6)-(8) и (14)-(16), а величина N_{Pz} определяется формулой (20). В последних формулах заданы параметры: G_x , G_y , G_z ; ρ_{Gx} , ρ_{Gy} , ρ_{Gz} ; B_z ; ρ_{Bx} , ρ_{By} , ρ_{Bz} ; P_z .

6. Трубка вдоль оси Ox

Теперь, когда параметры одной пачки получены, перейдем к расчету трубок, образованных наборами пачек с разделяющими их промежутками. Будем полагать, что заданы размеры блока по всем осям: S_x , S_y , S_z и рассмотрим трубки вдоль координатных осей по отдельности. Начнем с трубки, ориентированной вдоль оси Ox . Общая геометрия такой трубки показана на рис.3.

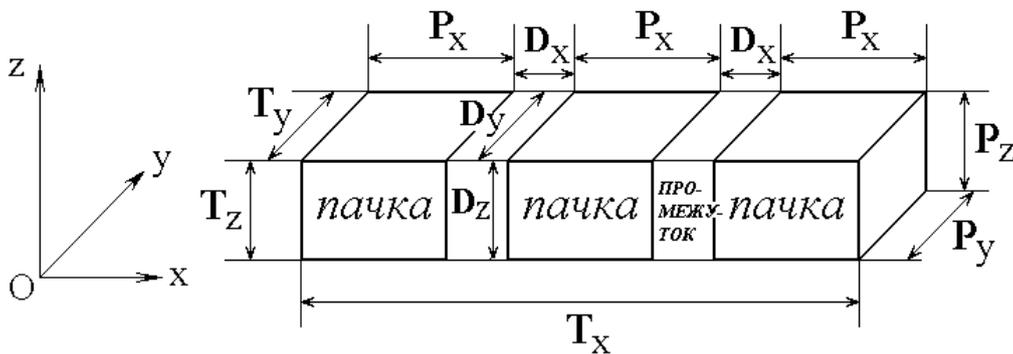


Рис.3. Геометрия трубки вдоль оси Ox .

7. Геометрические параметры трубки вдоль оси Ox

Для трубки вдоль оси Ox важен только размер блока по оси Ox , то есть заданный размер S_x . Полагаем, что трубка проходит вдоль оси Ox от одного конца блока до другого, так что ее длина равна длине блока по этой оси:

$$T_x = S_x. \tag{27}$$

Размеры трубки по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть по оси Oy размером слоя графена по этой оси, а по оси Oz – заданным размером пачки по этой оси P_z :

$$T_y = P_y = G_y; \quad (28)$$

$$T_z = P_z. \quad (29)$$

Трубка представляет собой набор пачек, разделенных промежутками. Полагаем, что размер промежутка по оси Ox задан, то есть известна величина D_x . Размеры промежутка по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть:

$$D_y = P_y = G_y; \quad (30)$$

$$D_z = P_z. \quad (31)$$

Положим далее, что трубка содержит N_{Tx} пачек и $N_{Tx} - 1$ промежутков. При этом полная длина трубки равна:

$$T_x = N_{Tx} P_x + (N_{Tx} - 1) D_x. \quad (32)$$

Из этого выражения находим число пачек в трубке N_{Tx} :

$$N_{Tx} = \frac{T_x + D_x}{P_x + D_x}, \quad (33)$$

откуда, учитывая (27) и (17) получаем:

$$N_{Tx} = \frac{S_x + D_x}{G_x + D_x}. \quad (34)$$

В этой формуле все параметры заданы.

8. Сопротивление трубки вдоль оси Ox

Так как ток течет вдоль трубки, то есть вдоль оси Ox , то важно сопротивление трубки только вдоль этой оси. Это сопротивление складывается из сопротивлений пачек и промежутков по той же оси. Сопротивление пачки вдоль оси Ox , то есть величина R_{Px} , определяется формулой (24). Для определения сопротивления промежутка между пачками должно быть задано удельное сопротивление промежутка вдоль оси Ox , то есть величина ρ_{Dx} . При этом получаем сопротивление промежутка вдоль оси Ox в виде:

$$R_{Dx} = \frac{\rho_{Dx} D_x}{D_y D_z}, \quad (35)$$

откуда, учитывая (30) и (31), получаем:

$$R_{Dx} = \frac{\rho_{Dx} D_x}{G_y P_z}. \quad (36)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Полное сопротивление трубки вдоль оси Ox равно сопротивлению последовательно соединенных N_{Tx} сопротивлений пачек и $N_{Tx} - 1$ сопротивлений промежутков:

$$R_{Tx} = N_{Tx} R_{Px} + (N_{Tx} - 1) R_{Dx}, \quad (37)$$

где R_{Px} и R_{Dx} определяются формулами (24) и (36), а величина N_{Tx} определяется формулой (34).

9. Блок с трубками по оси Ox

В предыдущем разделе требуемая величина сопротивления трубки вдоль оси Ox получена, так что теперь перейдем к расчету сопротивления вдоль этой оси для блока в целом. Общая геометрия задачи показана на рис.4.

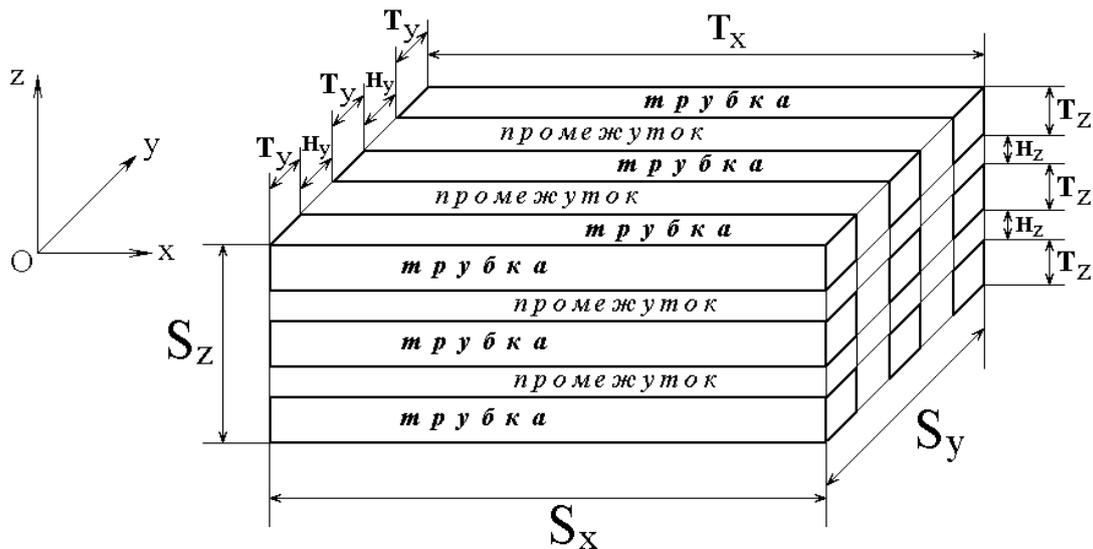


Рис.4. Геометрия блока с трубками вдоль оси Ox .

Как отмечено выше, заданы размеры блока по всем координатным осям:

S_x, S_y, S_z . Трубки ориентированы вдоль оси Ox . Их длина равна длине блока по этой оси, то есть определяется формулой (27). Размеры трубок по двум другим осям определяются формулами (28) и (29).

Вдоль осей Oy и Oz трубки расставлены с одинаковыми промежутками. Будем считать, что эти промежутки заданы, то есть известны величины H_y и H_z . Рассмотрим параметры блока вдоль осей Oy и Oz по отдельности.

Вдоль оси Oy блок содержит N_{Sy} трубок и $N_{Sy} - 1$ промежутков.

Полный размер блока вдоль этой оси равен:

$$S_y = N_{Sy}T_y + (N_{Sy} - 1)H_y. \quad (38)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oy :

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{T_y + H_y}. \quad (39)$$

Учитывая формулу (28), получаем:

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{G_y + H_y}. \quad (40)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Рассмотрим теперь ось Oz . Вдоль этой оси блок содержит N_{Sz} трубок и $N_{Sz} - 1$ промежутков. Полный размер блока вдоль этой оси равен:

$$S_z = N_{Sz}T_z + (N_{Sz} - 1)H_z. \quad (41)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oz :

$$N_{Sz} = \frac{S_z + H_z}{T_z + H_z}. \quad (42)$$

Учитывая формулу (29), получаем:

$$N_{S_z} = \frac{S_z + H_z}{P_z + H_z}. \quad (43)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Итак – блок по поперечному сечению содержит N_{S_y} трубок с размером T_y и N_{S_z} трубок с размером T_z . Полное количество трубок по поперечному сечению блока равно:

$$\Sigma(N_{S_y}N_{S_z}) = N_{S_y}N_{S_z}. \quad (44)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Oy равна:

$$\Sigma(T_y) = N_{S_y}T_y. \quad (45)$$

С учетом (28), получаем:

$$\Sigma(T_y) = N_{S_y}G_y. \quad (46)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Oz равна:

$$\Sigma(T_z) = N_{S_z}T_z. \quad (47)$$

С учетом (29), получаем:

$$\Sigma(T_z) = N_{S_z}P_z. \quad (48)$$

Площадь, занимаемая всеми трубками по поперечному сечению блока:

$$\Sigma(T_yT_z) = \Sigma(T_y) \cdot \Sigma(T_z). \quad (49)$$

Подставляя (46) и (48), получаем:

$$\Sigma(T_yT_z) = N_{S_y}N_{S_z}G_yP_z. \quad (50)$$

В этой формуле параметры G_y и P_z заданы, а параметры N_{S_y} и N_{S_z} определяются формулами (46) и (48), в которых все параметры также заданы.

Площадь всего блока по поперечному сечению равна:

$$\Sigma(S_yS_z) = S_yS_z. \quad (51)$$

Вычитая из поперечной площади блока (51) поперечную площадь всех трубок (49), получаем суммарную поперечную площадь промежутков:

$$\Sigma(H_y H_z) = \Sigma(S_y S_z) - \Sigma(T_y T_z). \quad (52)$$

Подставляя (51) и (50), получаем:

$$\Sigma(H_y H_z) = S_y S_z - N_{S_y} N_{S_z} G_y P_z. \quad (53)$$

В этой формуле параметры S_y , S_z , G_y , P_z заданы, а параметры N_{S_y} и N_{S_z} определяются формулами (40) и (43), где все входящие в них параметры также заданы.

10. Полное сопротивление блока вдоль оси Ox

Полное сопротивление блока вдоль оси Ox определяется параллельным соединением всех трубок и всех промежутков. Найдем эти сопротивления по отдельности.

Сопротивление одной трубки, равное R_{Tx} , определяется формулой (37). Количество трубок на поперечном сечении блока равно $\Sigma(N_{S_y} N_{S_z})$ и определяется формулой (44). Отсюда с помощью формулы (3) получаем полное сопротивление всех соединенных параллельно трубок по поперечному сечению блока:

$$R(\Sigma(N_{S_y} N_{S_z})) = \frac{R_{Tx}}{\Sigma(N_{S_y} N_{S_z})}. \quad (54)$$

Учитывая (33), получаем:

$$R(\Sigma(N_{S_y} N_{S_z})) = \frac{R_{Tx}}{N_{S_y} N_{S_z}}. \quad (55)$$

Рассмотрим теперь промежутки. Будем полагать, что задано удельное сопротивление промежутков по оси Ox , то есть величина ρ_{H_x} . Суммарная площадь всех промежутков $\Sigma(H_y H_z)$ известна и определяется формулой (53).

Длина H_x каждого из промежутков по оси Ox равна длине блока, то есть:

$$H_x = S_x. \quad (56)$$

Полное сопротивление суммы всех промежутков определяется формулой (3), с помощью которой получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dy}H_{Dz})) = \frac{\rho_{Hx}H_x}{\Sigma(H_yH_z)}. \quad (57)$$

Подставляя (56) и (53), получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dy}H_{Dz})) = \frac{\rho_{Hx}S_x}{S_yS_z - N_{Sy}N_{Sz}G_yP_z}. \quad (58)$$

Полное сопротивление блока определяется параллельным соединением сопротивлений всех трубок и сопротивлением всех промежутков. Так что по формуле параллельного соединения (3), получаем:

$$\frac{1}{R_{Sx}} = \frac{1}{R(\Sigma(N_{Sy}N_{Sz}))} + \frac{1}{R(\Sigma(H_{Dy}H_{Dz}))}. \quad (59)$$

Подставляя (55) и (58), получаем:

$$\frac{1}{R_{Sx}} = \frac{N_{Sy}N_{Sz}}{R_{Tx}} + \frac{S_yS_z - N_{Sy}N_{Sz}G_yP_z}{\rho_{Hx}S_x}. \quad (60)$$

Складывая дроби в правой части, получаем:

$$\frac{1}{R_{Sx}} = \frac{\rho_{Hx}S_xN_{Sy}N_{Sz} + R_{Tx}(S_yS_z - N_{Sy}N_{Sz}G_yP_z)}{\rho_{Hx}S_xR_{Tx}}. \quad (61)$$

Обращая эту формулу, получаем полное сопротивление блока по оси Ox :

$$R_{Sx} = \frac{\rho_{Hx}S_xR_{Tx}}{\rho_{Hx}S_xN_{Sy}N_{Sz} + R_{Tx}(S_yS_z - N_{Sy}N_{Sz}G_yP_z)}. \quad (62)$$

11. Удельное сопротивление блока вдоль оси Ox

Итак, известно полное сопротивление блока вдоль оси Ox в целом, равное R_{Sx} , длина блока вдоль той же оси S_x , а также поперечные размеры блока вдоль двух других осей S_y и S_z .

Для определения удельного сопротивления блока вдоль оси Ox воспользуемся формулой (2):

$$\rho_{Sx} = \frac{R_{Sx} S_y S_z}{S_x}. \quad (63)$$

Подставляя в эту формулу (62), получаем:

$$\rho_{Sx} = \frac{\rho_{Hx} S_y S_z R_{Tx}}{\rho_{Hx} S_x N_{Sy} N_{Sz} + R_{Tx} (S_y S_z - N_{Sy} N_{Sz} G_y P_z)}. \quad (64)$$

12. Алгоритм расчета удельного сопротивления блока вдоль оси Ox

Суммируя полученные в предыдущих разделах результаты, приведем краткий алгоритм расчета удельного сопротивления блока, включающего в себя трубки, ориентированные вдоль оси Ox .

Заданные геометрические параметры:

S_x, S_y, S_z – размеры блока по всем координатным осям;

G_x, G_y, G_z – размеры слоя графена по всем координатным осям;

P_z – размер пачки по оси Oz ;

B_z – размер промежутка между слоями графена внутри пачки по оси Oz ;

D_x – размер промежутка между пачками внутри трубки по оси Ox ;

H_y, H_z – размеры промежутков между трубками внутри блока по осям Oy и Oz .

Заданные электрические параметры:

ρ_{Gx} – удельное сопротивление слоя графена вдоль оси Ox ;

ρ_{Bx} – удельное сопротивление промежутка между слоями графена внутри пачки вдоль оси Ox ;

ρ_{Dx} – удельное сопротивление промежутка между пачками в трубке вдоль оси Ox ;

ρ_{Hx} – удельное сопротивление промежутка между трубками внутри блока вдоль оси Ox .

Последовательность шагов расчета:

ШАГ №1.

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oy по формуле (40):

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{G_y + H_y}. \quad (65)$$

ШАГ №2.

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oz по формуле (43):

$$N_{Sz} = \frac{S_z + H_z}{P_z + H_z}. \quad (66)$$

ШАГ №3.

Нахождение числа слоев графена в пачке по формуле (20):

$$N_{Pz} = \frac{P_z + B_z}{G_z + B_z}. \quad (67)$$

ШАГ №4.

Нахождение сопротивления слоя графена по оси Ox по формуле (6):

$$R_{Gx} = \frac{\rho_{Gx} G_x}{G_y G_z}; \quad (68)$$

ШАГ №5.

Нахождение сопротивления промежутка между двумя слоями графена внутри пачки по оси Ox по формуле (14):

$$R_{Bx} = \frac{\rho_{Bx} G_x}{G_y B_z}; \quad (69)$$

ШАГ №6.

Нахождение сопротивления пачки вдоль оси Ox по формуле (24):

$$R_{Px} = \frac{R_{Gx} R_{Bx}}{N_{Pz} R_{Bx} + (N_{Pz} - 1) R_{Gx}}. \quad (70)$$

ШАГ №7.

Нахождение сопротивления промежутка между пачками внутри трубки вдоль оси Ox по формуле (36):

$$R_{Dx} = \frac{\rho_{Dx} D_x}{G_y P_z}. \quad (71)$$

ШАГ №8.

Нахождение числа пачек в трубке по формуле (34):

$$N_{Tx} = \frac{S_x + D_x}{G_x + D_x}. \quad (72)$$

ШАГ №9.

Нахождение полного сопротивления трубки вдоль оси Ox по формуле (37):

$$R_{Tx} = N_{Tx} R_{Px} + (N_{Tx} - 1) R_{Dx}, \quad (73)$$

ШАГ №10.

Нахождение полного сопротивления блока вдоль оси Ox по формуле (62):

$$R_{Sx} = \frac{\rho_{Hx} S_x R_{Tx}}{\rho_{Hx} S_x N_{Sy} N_{Sz} + R_{Tx} (S_y S_z - N_{Sy} N_{Sz} G_y P_z)}. \quad (74)$$

ШАГ №11.

Нахождение удельного сопротивления блока вдоль оси Ox по формуле (64):

$$\rho_{Sx} = \frac{\rho_{Hx} S_y S_z R_{Tx}}{\rho_{Hx} S_x N_{Sy} N_{Sz} + R_{Tx} (S_y S_z - N_{Sy} N_{Sz} G_y P_z)}. \quad (75)$$

13. Трубка вдоль оси Oy

Рассмотрим теперь трубку, ориентированную вдоль оси Oy . Структура трубки и блока в целом вдоль оси Oy подобна таковой вдоль оси Ox с

точностью замены индекса « x » на индекс « y » и обратно. Однако геометрические размеры и электрические параметры пачек и промежутков между ними могут отличаться, поэтому и число пачек и трубок будет отличным. Чтобы избежать ошибок, могущих возникнуть при переименовании индексов, приведем порядок расчета задачи для трубок вдоль оси Oy полностью.

Общая геометрия задачи для трубки, ориентированной вдоль оси Oy , показана на рис.5.

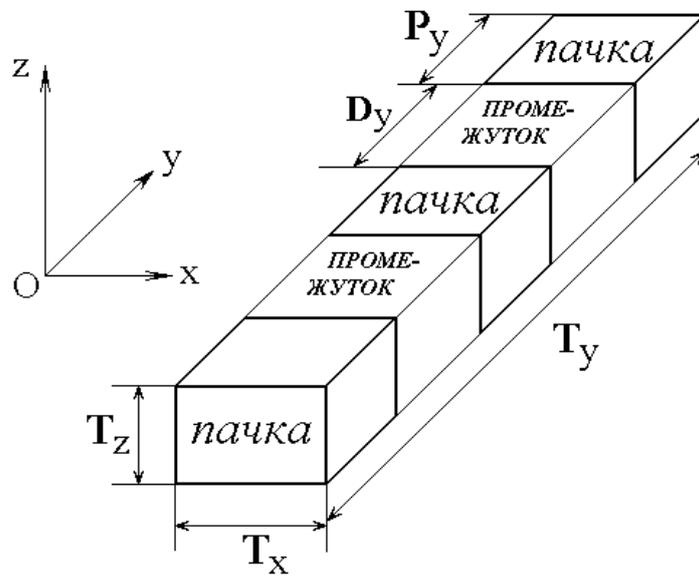


Рис.5. Общая геометрия трубки вдоль оси Oy .

14. Геометрические параметры трубки вдоль оси Oy

Для трубки вдоль оси Oy важен только размер блока по оси Oy , то есть заданный размер S_y . Полагаем, что трубка проходит вдоль оси Oy от одного конца блока до другого, так что ее длина равна длине блока по этой оси:

$$T_y = S_y. \tag{76}$$

Размеры трубки по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть по оси Ox размером слоя графена по этой оси, а по оси Oz – заданным размером пачки по этой оси P_z :

$$T_x = P_x = G_x; \quad (77)$$

$$T_z = P_z. \quad (78)$$

Трубка представляет собой набор пачек, разделенных промежутками. Полагаем, что размер промежутка по оси Oy задан, то есть известна величина D_y . Размеры промежутка по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть:

$$D_x = P_x = G_x; \quad (79)$$

$$D_z = P_z. \quad (80)$$

Полагаем, что трубка содержит N_{Ty} пачек и $N_{Ty} - 1$ промежутков. При этом полная длина трубки равна:

$$T_y = N_{Ty}P_y + (N_{Ty} - 1)D_y. \quad (81)$$

Из этого выражения находим число пачек в трубке N_{Ty} :

$$N_{Ty} = \frac{T_y + D_y}{P_y + D_y}, \quad (82)$$

откуда, учитывая (76) и (17) получаем:

$$N_{Ty} = \frac{S_y + D_x}{G_y + D_x}. \quad (83)$$

В этой формуле все параметры заданы.

15. Сопротивление трубки вдоль оси Oy

Так как ток течет вдоль трубки, то есть вдоль оси Oy , то важно сопротивление трубки только вдоль этой оси. Это сопротивление складывается из сопротивлений пачек и промежутков по той же оси. Сопротивление пачки вдоль оси Oy , то есть величина R_{Py} , определяется формулой (25). Для определения сопротивления промежутка между пачками должно быть задано удельное сопротивление промежутка вдоль оси Oy , то есть величина ρ_{Dy} .

При этом получаем сопротивление промежутка вдоль оси Oy в виде:

$$R_{Dy} = \frac{\rho_{Dy} D_y}{D_x D_z}, \quad (84)$$

откуда, учитывая (79) и (80), получаем:

$$R_{Dy} = \frac{\rho_{Dy} D_y}{G_x P_z}. \quad (85)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Полное сопротивление трубки вдоль оси Oy равно сопротивлению последовательно соединенных N_{Ty} сопротивлений пачек и $N_{Ty} - 1$ сопротивлений промежутков:

$$R_{Ty} = N_{Ty} R_{Py} + (N_{Ty} - 1) R_{Dy}, \quad (86)$$

где R_{Py} и R_{Dy} определяются формулами (24) и (36), а величина N_{Ty} определяется формулой (34).

16. Блок с трубками по оси Oy

Перейдем теперь к расчету параметров блока, состоящего из трубок, ориентированных вдоль оси Oy . Общая геометрия задачи показана на рис.6.

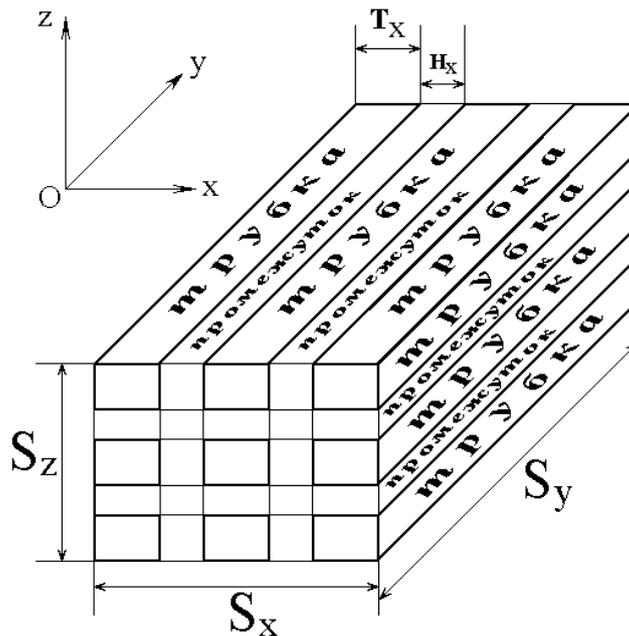


Рис.6. Геометрия блока с трубками вдоль оси Oy .

Как и ранее, будем считать заданными геометрические размеры блока по всем осям: S_x , S_y , S_z . Трубки ориентированы вдоль оси Oy . Их длина равна длине блока по этой оси, то есть определяется формулой (76). Размеры трубок по двум другим осям определяются формулами (77) и (78). Вдоль осей Ox и Oz трубки расставлены с одинаковыми промежутками. Будем считать, что эти промежутки заданы, то есть известны величины H_x и H_z . Рассмотрим параметры блока вдоль осей Ox и Oz по отдельности.

Вдоль оси Ox блок содержит N_{Sx} трубок и $N_{Sx} - 1$ промежутков. Полный размер блока вдоль оси Ox равен:

$$S_x = N_{Sx}T_x + (N_{Sx} - 1)H_x. \quad (87)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Ox :

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{T_x + H_x}. \quad (88)$$

Учитывая формулу (77), получаем:

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{G_x + H_x}. \quad (89)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Рассмотрим теперь ось Oz . Вдоль этой оси блок содержит N_{Sz} трубок и $N_{Sz} - 1$ промежутков. Полный размер блока вдоль оси Oz равен:

$$S_z = N_{Sz}T_z + (N_{Sz} - 1)H_z. \quad (90)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oz :

$$N_{Sz} = \frac{S_z + H_z}{T_z + H_z}. \quad (91)$$

Учитывая формулу (78), получаем:

$$N_{S_z} = \frac{S_z + H_z}{P_z + H_z}. \quad (92)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Итак – блок по поперечному сечению содержит N_{S_x} трубок с размером T_x и N_{S_z} трубок с размером T_z . Полное количество трубок по поперечному сечению блока равно:

$$\Sigma(N_{S_x}N_{S_z}) = N_{S_x}N_{S_z}. \quad (93)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Ox равна:

$$\Sigma(T_x) = N_{S_x}T_x. \quad (94)$$

С учетом (77), получаем:

$$\Sigma(T_x) = N_{S_x}G_x. \quad (95)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Oz равна:

$$\Sigma(T_z) = N_{S_z}T_z. \quad (96)$$

С учетом (78), получаем:

$$\Sigma(T_z) = N_{S_z}P_z. \quad (97)$$

Площадь, занимаемая всеми трубками по поперечному сечению блока:

$$\Sigma(T_xT_z) = \Sigma(T_x) \cdot \Sigma(T_z). \quad (98)$$

Подставляя (95) и (97), получаем:

$$\Sigma(T_xT_z) = N_{S_x}N_{S_z}G_xP_z. \quad (99)$$

В этой формуле параметры G_x и P_z заданы, а параметры N_{S_x} и N_{S_z} определяются формулами (95) и (97), в которых все параметры также заданы.

Площадь всего блока по поперечному сечению равна:

$$\Sigma(S_xS_z) = S_xS_z. \quad (100)$$

Вычитая из поперечной площади блока (100) поперечную площадь всех трубок (98), получаем суммарную поперечную площадь промежутков:

$$\Sigma(H_xH_z) = \Sigma(S_xS_z) - \Sigma(T_xT_z). \quad (101)$$

Подставляя (100) и (99), получаем:

$$\Sigma(H_x H_z) = S_x S_z - N_{Sx} N_{Sz} G_x P_z. \quad (102)$$

В этой формуле параметры S_x , S_z , G_x , P_z заданы, а параметры N_{Sx} и N_{Sz} определяются формулами (89) и (92), где все входящие в них параметры также заданы.

17. Полное сопротивление блока вдоль оси Oy

Полное сопротивление блока вдоль оси Oy определяется параллельным соединением всех трубок и всех промежутков. Найдем эти сопротивления по отдельности.

Сопротивление одной трубки, равное R_{Ty} определяется формулой (97).

Количество трубок на поперечном сечении блока равно $\Sigma(N_{Sx} N_{Sz})$ и определяется формулой (93). Отсюда с помощью формулы (3) получаем полное сопротивление всех соединенных параллельно трубок по поперечному сечению блока:

$$R(\Sigma(N_{Sx} N_{Sz})) = \frac{R_{Ty}}{\Sigma(N_{Sx} N_{Sz})}. \quad (103)$$

Учитывая (93), получаем:

$$R(\Sigma(N_{Sx} N_{Sz})) = \frac{R_{Ty}}{N_{Sx} N_{Sz}}. \quad (104)$$

Рассмотрим теперь промежутки. Будем полагать, что задано удельное сопротивление промежутков по оси Oy , то есть величина ρ_{Hy} . Суммарная площадь всех промежутков $\Sigma(H_x H_z)$ известна и определяется формулой (102). Длина H_y каждого из промежутков по оси Oy равна длине блока, то есть:

$$H_y = S_y. \quad (105)$$

Полное сопротивление суммы всех промежутков определяется формулой (3), с помощью которой получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dz})) = \frac{\rho_{Hy}H_y}{\Sigma(H_xH_z)}. \quad (106)$$

Подставляя (105) и (102), получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dz})) = \frac{\rho_{Hy}S_y}{S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z}. \quad (107)$$

Полное сопротивление блока определяется параллельным соединением сопротивлений всех трубок и сопротивлением всех промежутков. В соответствии с формулой (3) получаем:

$$\frac{1}{R_{Sy}} = \frac{1}{R(\Sigma(N_{Sx}N_{Sz}))} + \frac{1}{R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dz}))}. \quad (108)$$

Подставляя (104) и (107), получаем:

$$\frac{1}{R_{Sy}} = \frac{N_{Sx}N_{Sz}}{R_{Ty}} + \frac{S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z}{\rho_{Hy}S_y}. \quad (109)$$

Складывая дроби в правой части, получаем:

$$\frac{1}{R_{Sy}} = \frac{\rho_{Hy}S_yN_{Sx}N_{Sz} + R_{Ty}(S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z)}{\rho_{Hy}S_yR_{Ty}}. \quad (110)$$

Обращая эту формулу, получаем полное сопротивление блока по оси Oy :

$$R_{Sy} = \frac{\rho_{Hy}S_yR_{Ty}}{\rho_{Hy}S_yN_{Sx}N_{Sz} + R_{Ty}(S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z)}. \quad (111)$$

18. Удельное сопротивление блока вдоль оси Oy

Итак, известно полное сопротивление блока вдоль оси Oy в целом, равное R_{Sy} , длина блока вдоль той же оси S_y , а также поперечные размеры блока вдоль двух других осей S_x и S_z .

Для определения удельного сопротивления блока вдоль оси Oy воспользуемся формулой (2):

$$\rho_{Sy} = \frac{R_{Sy} S_x S_z}{S_y}. \quad (112)$$

Подставляя в эту формулу (111), получаем:

$$\rho_{Sy} = \frac{\rho_{Hy} S_x S_z R_{Ty}}{\rho_{Hy} S_y N_{Sx} N_{Sz} + R_{Ty} (S_x S_z - N_{Sx} N_{Sz} G_x P_z)}. \quad (113)$$

19. Алгоритм расчета удельного сопротивления блока вдоль оси Oy

Приведем краткий алгоритм расчета удельного сопротивления блока, включающего в себя трубки, ориентированные вдоль оси Oy .

Заданные геометрические параметры:

S_x, S_y, S_z – размеры блока по всем координатным осям;

G_x, G_y, G_z – размеры слоя графена по всем координатным осям;

P_z – размер пачки по оси Oz ;

B_z – размер промежутка между слоями графена внутри пачки по оси Oz ;

D_y – размер промежутка между пачками внутри трубки по оси Oy ;

H_x, H_z – размеры промежутков между трубками внутри блока по осям Ox и Oz .

Заданные электрические параметры:

ρ_{Gy} – удельное сопротивление слоя графена вдоль оси Oy ;

ρ_{By} – удельное сопротивление промежутка между слоями графена внутри пачки вдоль оси Oy ;

ρ_{Dy} – удельное сопротивление промежутка между пачками в трубке вдоль оси Oy ;

ρ_{Hy} – удельное сопротивление промежутка между трубками внутри блока вдоль оси Oy .

Последовательность шагов расчета:**ШАГ №1.**

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Ox по формуле (89):

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{G_x + H_x}. \quad (114)$$

ШАГ №2.

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oz по формуле (92):

$$N_{Sz} = \frac{S_z + H_z}{P_z + H_z}. \quad (115)$$

ШАГ №3.

Нахождение числа слоев графена в пачке по формуле (20):

$$N_{Pz} = \frac{P_z + B_z}{G_z + B_z}. \quad (116)$$

ШАГ №4.

Нахождение сопротивления слоя графена по оси Oy по формуле (6):

$$R_{Gy} = \frac{\rho_{Gy} G_y}{G_x G_z}; \quad (117)$$

ШАГ №5.

Нахождение сопротивления промежутка между двумя слоями графена внутри пачки по оси Oy по формуле (15):

$$R_{By} = \frac{\rho_{By} G_y}{G_x B_z}; \quad (118)$$

ШАГ №6.

Нахождение сопротивления пачки вдоль оси Oy по формуле (25):

$$R_{Py} = \frac{R_{Gy}R_{By}}{N_{Pz}R_{By} + (N_{Pz} - 1)R_{Gy}}. \quad (119)$$

ШАГ №7.

Нахождение сопротивления промежутка между пачками внутри трубки вдоль оси Oy по формуле (85):

$$R_{Dy} = \frac{\rho_{Dy}D_y}{G_x P_z}. \quad (120)$$

ШАГ №8.

Нахождение числа пачек в трубке по формуле (83):

$$N_{Ty} = \frac{S_y + D_y}{G_y + D_y}. \quad (121)$$

ШАГ №9.

Нахождение полного сопротивления трубки вдоль оси Oy по формуле (86):

$$R_{Ty} = N_{Ty}R_{Py} + (N_{Ty} - 1)R_{Dy}, \quad (122)$$

ШАГ №10.

Нахождение полного сопротивления блока вдоль оси Oy по формуле (111):

$$R_{Sy} = \frac{\rho_{Hy}S_yR_{Ty}}{\rho_{Hy}S_yN_{Sx}N_{Sz} + R_{Ty}(S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z)}. \quad (123)$$

ШАГ №11.

Нахождение удельного сопротивления блока вдоль оси Oy по формуле (113):

$$\rho_{Sy} = \frac{\rho_{Hy}S_xS_zR_{Ty}}{\rho_{Hy}S_yN_{Sx}N_{Sz} + R_{Ty}(S_xS_z - N_{Sx}N_{Sz}G_xP_z)}. \quad (124)$$

20. Трубка вдоль оси Oz

Рассмотрим теперь трубку, ориентированную вдоль оси Oz . Структура трубки и блока в целом вдоль оси Oz подобна таковой вдоль осей Ox и Oy ,

однако простая замена индексов здесь осложняется тем обстоятельством, что слои графена в пачках ориентированы не вдоль, а поперек рассматриваемой оси, так что обозначения получаются другими. Поэтому приведем порядок расчета задачи для трубок вдоль оси Oz полностью.

Общая геометрия задачи для трубки, ориентированной вдоль оси Oz , показана на рис.7.

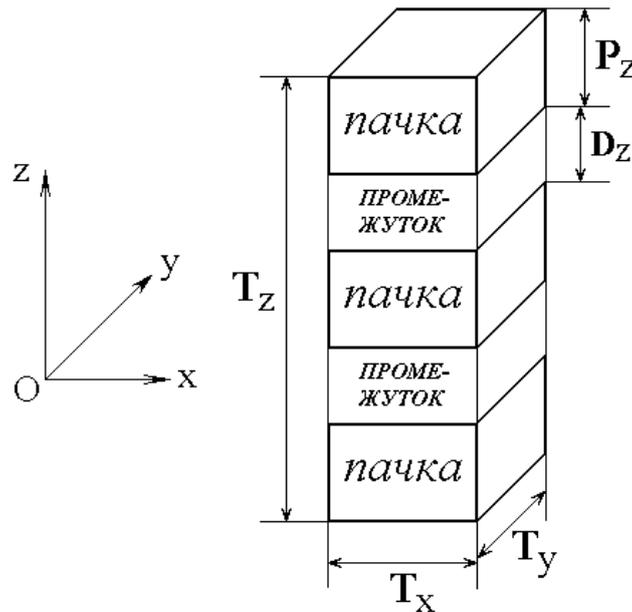


Рис.7. Общая геометрия трубки вдоль оси Oz .

21. Геометрические параметры трубки вдоль оси Oz

Для трубки вдоль оси Oz важен только размер блока по оси Oz , то есть заданный размер S_z . Полагаем, что трубка проходит вдоль оси Oz от одного конца блока до другого, так что ее длина равна длине блока по этой оси:

$$T_z = S_z. \quad (125)$$

Размеры трубки по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть по оси Ox размером слоя пачки P_x или графена по этой оси G_x , а по оси Oy – размером пачки P_y или слоя графена по этой оси G_y :

$$T_x = P_x = G_x; \quad (126)$$

$$T_y = P_y = G_y. \quad (127)$$

Трубка представляет собой набор пачек, разделенных промежутками. Полагаем, что размер промежутка по оси Oz задан, то есть известна величина D_z . Размеры промежутка по двум другим осям определяются размерами пачки по этим осям, то есть:

$$D_y = P_y = G_y; \quad (128)$$

$$D_x = P_x = G_x. \quad (129)$$

Полагаем, что трубка содержит N_{Tz} пачек и $N_{Tz} - 1$ промежутков. При этом полная длина трубки равна:

$$T_z = N_{Tz} P_z + (N_{Tz} - 1) D_z. \quad (130)$$

Из этого выражения находим число пачек в трубке N_{Tz} :

$$N_{Tz} = \frac{T_z + D_z}{P_z + D_z}, \quad (131)$$

откуда, учитывая (125), получаем:

$$N_{Tz} = \frac{S_z + D_z}{P_z + D_z}. \quad (132)$$

В этой формуле все параметры заданы.

22. Сопротивление трубки вдоль оси Oz

Так как ток течет вдоль трубки, то есть вдоль оси Oz , то важно сопротивление трубки только вдоль этой оси. Это сопротивление складывается из сопротивлений пачек и промежутков по той же оси. Сопротивление пачки вдоль оси Oz , то есть величина R_{Pz} , определяется формулой (26). Для определения сопротивления промежутка между пачками должно быть задано удельное сопротивление промежутка вдоль оси Oz , то есть величина ρ_{Dz} . При этом получаем сопротивление промежутка вдоль оси Oz в виде:

$$R_{Dz} = \frac{\rho_{Dz} D_z}{D_x D_y}, \quad (133)$$

откуда, учитывая (128) и (129), получаем:

$$R_{Dz} = \frac{\rho_{Dz} D_z}{G_x G_y}. \quad (134)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Полное сопротивление трубки вдоль оси Oz равно сопротивлению последовательно соединенных N_{Tz} сопротивлений пачек и $N_{Tz} - 1$ сопротивлений промежутков:

$$R_{Tz} = N_{Tz} R_{Pz} + (N_{Tz} - 1) R_{Dz}, \quad (135)$$

где R_{Pz} и R_{Dz} определяются формулами (26) и (134), а величина N_{Tz} определяется формулой (132).

23. Блок с трубками по оси Oz

Рассмотрим теперь параметры блока, состоящего из трубок, ориентированных вдоль оси Oz . Общая геометрия задачи показана на рис.8.

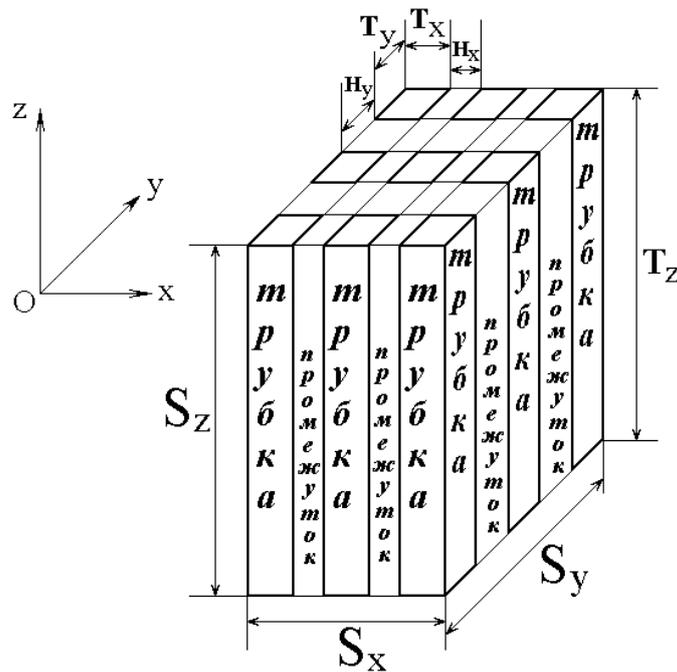


Рис.8. Геометрия блока с трубками вдоль оси Oz .

Трубки ориентированы вдоль оси Oz . Их длина равна длине блока по этой оси, то есть определяется формулой (125). Размеры трубок по двум другим осям определяются формулами (126) и (127). Вдоль осей Ox и Oy трубки расставлены с одинаковыми промежутками. Будем считать, что эти

промежутки заданы, то есть известны величины H_x и H_y . Рассмотрим параметры блока вдоль осей Ox и Oy по отдельности.

Вдоль оси Ox блок содержит N_{Sx} трубок и $N_{Sx} - 1$ промежутков.

Полный размер блока вдоль оси Ox равен:

$$S_x = N_{Sx}T_x + (N_{Sx} - 1)H_x. \quad (136)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Ox :

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{T_x + H_x}. \quad (137)$$

Учитывая формулу (126), получаем:

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{G_x + H_x}. \quad (138)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Рассмотрим теперь ось Oy . Вдоль этой оси блок содержит N_{Sy} трубок и $N_{Sy} - 1$ промежутков. Полный размер блока вдоль оси Oy равен:

$$S_y = N_{Sy}T_y + (N_{Sy} - 1)H_y. \quad (139)$$

Из этого выражения находим количество трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oy :

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{T_y + H_y}. \quad (140)$$

Учитывая формулу (127), получаем:

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{P_y + H_y}. \quad (141)$$

В этой формуле все параметры заданы.

Итак – блок по поперечному сечению содержит N_{Sx} трубок с размером T_x и N_{Sy} трубок с размером T_y . Полное количество трубок по поперечному сечению блока равно:

$$\Sigma(N_{Sx}N_{Sy}) = N_{Sx}N_{Sy}. \quad (142)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Ox равна:

$$\Sigma(T_x) = N_{Sx}T_x. \quad (143)$$

С учетом (126), получаем:

$$\Sigma(T_x) = N_{Sx}G_x. \quad (144)$$

Суммарная длина поперечных сечений трубок по оси Oy равна:

$$\Sigma(T_y) = N_{Sy}T_y. \quad (145)$$

С учетом (127), получаем:

$$\Sigma(T_y) = N_{Sy}P_y. \quad (146)$$

Площадь, занимаемая всеми трубками по поперечному сечению блока:

$$\Sigma(T_xT_y) = \Sigma(T_x) \cdot \Sigma(T_y). \quad (147)$$

Подставляя (144) и (146), получаем:

$$\Sigma(T_xT_y) = N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y. \quad (148)$$

В этой формуле параметры G_x и G_y заданы, а параметры N_{Sx} и N_{Sy} определяются формулами (144) и (146), в которых все параметры также заданы.

Площадь всего блока по поперечному сечению равна:

$$\Sigma(S_xS_y) = S_xS_y. \quad (149)$$

Вычитая из поперечной площади блока (149) поперечную площадь всех трубок (147), получаем суммарную поперечную площадь промежутков:

$$\Sigma(H_xH_y) = \Sigma(S_xS_y) - \Sigma(T_xT_y). \quad (150)$$

Подставляя (149) и (148), получаем:

$$\Sigma(H_xH_y) = S_xS_y - N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y. \quad (151)$$

В этой формуле параметры S_x, S_z, G_x, G_y заданы, а параметры N_{Sx} и N_{Sy} определяются формулами (138) и (141), где все входящие в них параметры также заданы.

24. Полное сопротивление блока вдоль оси Oz

Полное сопротивление блока вдоль оси Oz определяется параллельным соединением всех трубок и всех промежутков. Найдем эти сопротивления по отдельности.

Сопротивление одной трубки, равное R_{Tz} , определяется формулой (135). Количество трубок на поперечном сечении блока равно $\Sigma(N_{Sx}N_{Sy})$ и определяется формулой (142). Отсюда с помощью формулы (3) получаем полное сопротивление всех соединенных параллельно трубок по поперечному сечению блока:

$$R(\Sigma(N_{Sx}N_{Sy})) = \frac{R_{Tz}}{\Sigma(N_{Sx}N_{Sy})}. \quad (152)$$

Учитывая (142), получаем:

$$R(\Sigma(N_{Sx}N_{Sy})) = \frac{R_{Ty}}{N_{Sx}N_{Sy}}. \quad (153)$$

Рассмотрим теперь промежутки. Будем полагать, что задано удельное сопротивление промежутков по оси Oz , то есть величина ρ_{Hz} . Суммарная площадь всех промежутков $\Sigma(H_x H_y)$ известна и определяется формулой (151). Длина H_z каждого из промежутков по оси Oz равна длине блока, то есть:

$$H_z = S_z. \quad (154)$$

Полное сопротивление суммы всех промежутков определяется формулой (3), с помощью которой получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dy})) = \frac{\rho_{Hz}H_z}{\Sigma(H_xH_y)}. \quad (155)$$

Подставляя (154) и (151), получаем:

$$R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dy})) = \frac{\rho_{Hy}S_z}{S_xS_y - N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y}. \quad (156)$$

Полное сопротивление блока определяется параллельным соединением сопротивлений всех трубок и сопротивлением всех промежутков. Так что по формуле параллельного соединения (3), получаем:

$$\frac{1}{R_{S_z}} = \frac{1}{R(\Sigma(N_{Sx}N_{Sy}))} + \frac{1}{R(\Sigma(H_{Dx}H_{Dy}))}. \quad (157)$$

Подставляя (153) и (156), получаем:

$$\frac{1}{R_{S_z}} = \frac{N_{Sx}N_{Sy}}{R_{T_z}} + \frac{S_xS_y - N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y}{\rho_{Hz}S_z}. \quad (158)$$

Складывая дроби в правой части, получаем:

$$\frac{1}{R_{S_z}} = \frac{\rho_{Hz}S_zN_{Sx}N_{Sy} + R_{T_z}(S_xS_y - N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y)}{\rho_{Hz}S_zR_{T_z}}. \quad (159)$$

Обращая эту формулу, получаем полное сопротивление блока по оси Oz :

$$R_{S_z} = \frac{\rho_{Hz}S_zR_{T_z}}{\rho_{Hz}S_zN_{Sx}N_{Sy} + R_{T_z}(S_xS_y - N_{Sx}N_{Sy}G_xG_y)}. \quad (160)$$

25. Удельное сопротивление блока вдоль оси Oz

Итак, известно полное сопротивление блока вдоль оси Oz в целом, равное R_{S_z} , длина блока вдоль той же оси S_z , а также поперечные размеры блока вдоль двух других осей S_x и S_y .

Для определения удельного сопротивления блока вдоль оси Oz воспользуемся формулой (2):

$$\rho_{S_z} = \frac{R_{S_z} S_x S_y}{S_z}. \quad (161)$$

Подставляя в эту формулу (160), получаем:

$$\rho_{S_z} = \frac{\rho_{H_z} S_x S_y R_{T_z}}{\rho_{H_z} S_z N_{S_x} N_{S_y} + R_{T_z} (S_x S_y - N_{S_x} N_{S_y} G_x G_y)}. \quad (162)$$

26. Алгоритм расчета удельного сопротивления блока вдоль оси Oz

Приведем краткий алгоритм расчета удельного сопротивления блока, включающего в себя трубки, ориентированные вдоль оси Oz .

Заданные геометрические параметры:

S_x, S_y, S_z – размеры блока по всем координатным осям;

G_x, G_y, G_z – размеры слоя графена по всем координатным осям;

P_z – размер пачки по оси Oz ;

B_z – размер промежутка между слоями графена внутри пачки по оси Oz ;

D_z – размер промежутка между пачками внутри трубки по оси Oz ;

H_x, H_y – размеры промежутков между трубками внутри блока по осям Ox и Oy .

Заданные электрические параметры:

ρ_{G_z} – удельное сопротивление слоя графена вдоль оси Oz ;

ρ_{B_z} – удельное сопротивление промежутка между слоями графена внутри пачки вдоль оси Oz ;

ρ_{D_z} – удельное сопротивление промежутка между пачками в трубке вдоль оси Oz ;

ρ_{H_z} – удельное сопротивление промежутка между трубками внутри блока вдоль оси Oz .

Последовательность шагов расчета:

ШАГ №1.

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Ox по формуле (138):

$$N_{Sx} = \frac{S_x + H_x}{G_x + H_x}. \quad (163)$$

ШАГ №2.

Нахождение количества трубок, помещающихся в блоке вдоль оси Oy по формуле (141):

$$N_{Sy} = \frac{S_y + H_y}{G_y + H_y}. \quad (164)$$

ШАГ №3.

Нахождение числа слоев графена в пачке по формуле (20):

$$N_{Pz} = \frac{P_z + B_z}{G_z + B_z}. \quad (165)$$

ШАГ №4.

Нахождение сопротивления слоя графена по оси Oz по формуле (6):

$$R_{Gz} = \frac{\rho_{Gz} G_z}{G_x G_y}; \quad (166)$$

ШАГ №5.

Нахождение сопротивления промежутка между двумя слоями графена внутри пачки по оси Oz по формуле (16):

$$R_{Bz} = \frac{\rho_{Bz} B_z}{G_x G_y}. \quad (167)$$

ШАГ №6.

Нахождение сопротивления пачки вдоль оси Oz по формуле (26):

$$R_{Pz} = N_{Pz} R_{Gz} + (N_{Pz} - 1) R_{Bz}. \quad (168)$$

ШАГ №7.

Нахождение сопротивления промежутка между пачками внутри трубки вдоль оси Oz по формуле (134):

$$R_{Dz} = \frac{\rho_{Dz} D_z}{G_x G_y}. \quad (169)$$

ШАГ №8.

Нахождение числа пачек в трубке по формуле (132):

$$N_{Tz} = \frac{S_z + D_z}{P_z + D_z}. \quad (170)$$

ШАГ №9.

Нахождение полного сопротивления трубки вдоль оси Oz по формуле (135):

$$R_{Tz} = N_{Tz} R_{Pz} + (N_{Tz} - 1) R_{Dz}, \quad (171)$$

ШАГ №10.

Нахождение полного сопротивления блока вдоль оси Oz по формуле (160):

$$R_{Sz} = \frac{\rho_{Hz} S_z R_{Tz}}{\rho_{Hz} S_z N_{Sx} N_{Sy} + R_{Tz} (S_x S_y - N_{Sx} N_{Sy} G_x G_y)}. \quad (172)$$

ШАГ №11.

Нахождение удельного сопротивления блока вдоль оси Oz по формуле (162):

$$\rho_{Sz} = \frac{\rho_{Hz} S_x S_y R_{Tz}}{\rho_{Hz} S_z N_{Sx} N_{Sy} + R_{Tz} (S_x S_y - N_{Sx} N_{Sy} G_x G_y)}. \quad (173)$$

27. Пример расчета удельных сопротивлений блока по осям

Рассмотрим теперь пример расчета параметров блоков на основе модели трубок. Следует заметить, что предложенная модель включает в себя значительное число входных параметров, на сегодняшний день в эксперименте не измеренных. Будем опираться на данные, приведенные в обзорной монографии [24].

Более или менее уверенно можно говорить лишь о геометрии структуры. Так размеры образующего пачку слоя графена составляют от 5 до 15 нм,

толщина слоя графена – 1-2 нм. Расстояние между слоями внутри пачки – тоже 1-2 нм. Число слоев графена внутри пачки – от единиц до нескольких десятков. Расстояние между пачками по всем трем координатам составляет от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров. Размеры блока, в пределах которого можно считать расположение пачек более или менее упорядоченным, меняется в весьма широких пределах – от десяти до сотен и тысяч нанометров, а в случае формирования из пачек глобул и особенно протяженных лент – до нескольких десятков тысяч нанометров. Доступная из эксперимента информация об электрических параметрах шунгита значительно более скромная. Более или менее уверенно можно опираться на данные лишь по графиту, где графеновые слои упорядочены на значительном протяжении, достигающем единиц и десятков микрометров. Так, согласно данным, приведенным в работах [24, 52], удельная проводимость графита вдоль слоев графена составляет $4 \cdot 10^7$ См/м, а поперек тех же слоев – $2 \cdot 10^3$ См/м, то есть на четыре порядка меньше. Удельные сопротивления для этих случаев соответственно равны: вдоль слоев $0,25 \cdot 10^{-7}$ Ом м = $2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом м, поперек слоев – $0,5 \cdot 10^{-3}$ Ом м = $5 \cdot 10^{-4}$ Ом м.

Более подробных данных в известной авторам литературе найти им не удалось. Поэтому в сложившейся ситуации, ввиду значительного разнообразия и высокой неопределенности входных параметров, в рамках настоящей работы будем придерживаться таких значений, которые наиболее полно позволяют выявить физическую сторону явлений, описываемых предлагаемой моделью трубок. Основное внимание уделим расчету удельных сопротивлений блока вдоль различных осей координат в соответствии с формулами (64), (113), (162). Сначала рассмотрим, как зависят промежуточные параметры расчета от входных параметров по различным осям. В качестве первого примера будем опираться на набор входных параметров, приведенный в таблице №1.

Таблица №1. Параметры материала (входные параметры задачи).

Геометрические параметры		
Вдоль оси Ox	вдоль оси Oy	вдоль оси Oz
$S_x = 1000$ нм	$S_y = 1000$ нм	$S_z = 1000$ нм
$G_x = 10$ нм	$G_y = 10$ нм	$G_z = 1$ нм
$P_x = 10$ нм	$P_y = 10$ нм	$P_z = 10$ нм
$B_x = 10$ нм	$B_y = 10$ нм	$B_z = 1$ нм
$D_x = 10$ нм	$D_y = 10$ нм	$D_z = 10$ нм
$H_x = 10$ нм	$H_y = 10$ нм	$H_z = 10$ нм
Электрические параметры		
$\rho_{Gx} = 10^{-7}$ Ом м	$\rho_{Gy} = 10^{-7}$ Ом м	$\rho_{Gz} = 10^{-3}$ Ом м
$\rho_{Bx} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{By} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{Bz} = 10^{-4}$ Ом м
$\rho_{Dx} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{Dy} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{Dz} = 10^{-4}$ Ом м
$\rho_{Hx} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{Hy} = 10^{-4}$ Ом м	$\rho_{Hz} = 10^{-4}$ Ом м

В таблице параметры $D_{x,y,z}$ и $H_{x,y,z}$ указаны для размера вдоль трубки.

Геометрические параметры взяты заведомо в виде круглых чисел, кратных целой десятке, для того, чтобы промежуточные параметры расчета имели наиболее простой вид. То же касается электрических параметров, причем удельные сопротивления вдоль и поперек слоя графена $\rho_{Gx,y}$ и ρ_{Gz} выбраны отличающимися на четыре порядка, как это следует из эксперимента по графиту.

Результаты расчета по формулам, полученным в разделах №12, №18 и №26, приведены в таблице №2. В первом столбце таблицы содержатся номера шагов расчета в соответствии с алгоритмами расчета по осям, а в следующих трех – получающиеся промежуточные результаты. В двух последних строках

таблицы приведены значения получаемых абсолютных и удельных сопротивлений по соответствующим осям.

Таблица №2. Текущие параметры расчета для различных осей.

№№ шага	Трубки по оси Ox	Трубки по оси Oy	Трубки по оси Oz
1	$N_{Sy} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Sx} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Sx} = 0,505 \cdot 10^2$
2	$N_{Sz} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Sz} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Sy} = 0,505 \cdot 10^2$
3	$N_{Pz} = 0,555 \cdot 10^1$	$N_{Pz} = 0,555 \cdot 10^1$	$N_{Pz} = 0,555 \cdot 10^1$
4	$R_{Gx} = 0,100 \cdot 10^{-6}$	$R_{Gy} = 0,100 \cdot 10^{-6}$	$R_{Gz} = 0,100 \cdot 10^{-4}$
5	$R_{Bx} = 0,100 \cdot 10^{-3}$	$R_{By} = 0,100 \cdot 10^{-3}$	$R_{Bz} = 0,100 \cdot 10^{-5}$
6	$R_{Px} = 0,182 \cdot 10^{-7}$	$R_{Py} = 0,182 \cdot 10^{-7}$	$R_{Pz} = 0,595 \cdot 10^{-4}$
7	$R_{Dx} = 0,100 \cdot 10^{-4}$	$R_{Dy} = 0,100 \cdot 10^{-4}$	$R_{Dz} = 0,100 \cdot 10^{-4}$
8	$N_{Tx} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Ty} = 0,505 \cdot 10^2$	$N_{Tz} = 0,505 \cdot 10^2$
9	$R_{Tx} = 0,496 \cdot 10^{-3}$	$R_{Ty} = 0,496 \cdot 10^{-3}$	$R_{Tz} = 0,350 \cdot 10^{-2}$
	Абсолютное сопротивление по оси Ox	Абсолютное сопротивление по оси Oy	Абсолютное сопротивление по оси Oz
10	$R_{Sx} = 0,794 \cdot 10^{-7}$	$R_{Sy} = 0,794 \cdot 10^{-7}$	$R_{Sz} = 0,122 \cdot 10^{-6}$
	Удельное сопротивление по оси Ox	Удельное сопротивление по оси Oy	Удельное сопротивление по оси Oz
11	$\rho_{Sx} = 0,794 \cdot 10^{-4}$	$\rho_{Sy} = 0,794 \cdot 10^{-4}$	$\rho_{Sz} = 0,122 \cdot 10^{-3}$

В первых двух строках таблицы (шаги 1-2) приведены количества трубок в блоке в направлениях, поперечных оси соответствующей трубки, так как вдоль такой оси трубка проходит через блок вся целиком. Можно видеть, что число трубок в блоке вдоль направления, перпендикулярного той оси, по которой трубки выстроены, составляет около 50, что определяется размером пачки, то есть слоя графена в этом направлении.

В третьей строке приведено количество слоев графена в пачке, не зависящее от ориентации трубки, поэтому одинаковое для всех осей. Дробный характер этого числа обусловлен чисто арифметической особенностью расчета, так как при выводе формул (19) и (20) предполагалось, что число промежутков на единицу меньше числа слоев, тогда как при одинаковом числе слоев и промежутков в пачке на одну из ее поверхностей приходится слой графена, а на другую промежуток, то есть толщина пачки получается заниженной на толщину одного промежутка. То же касается дробного характера чисел трубок в блоке, приведенных в первых двух строках таблицы. Очевидно, такая неточность может проявиться заметно только при очень малом числе слоев или трубок (два-три), тогда как наблюдаемое в эксперименте число слоев в пачке составляет не менее пяти, а трубок в блоке еще больше, поэтому на дробность упомянутых параметров обращать внимания не будем.

В строках таблицы с четвертой по седьмую приведены значения сопротивлений слоев графена, пачек и промежутков между теми и другими. Здесь никаких особенностей не наблюдается, то есть результаты полностью соответствуют заданным параметрам.

В восьмой строке таблицы приведено число пачек в трубке. Здесь дробный характер этого числа обусловлен теми же причинами, что и дробность числа слоев и трубок. Здесь число пачек порядка пятидесяти, поэтому дробность тоже можно не учитывать.

В девятой строке таблицы приведено абсолютное сопротивление трубки в целом, состоящее из последовательно соединенных сопротивлений входящих в трубку пачек и промежутков.

В десятой строке таблицы приведено абсолютное сопротивление блока в целом, зависящее от его геометрических размеров и в одиннадцатой – удельное сопротивление материала блока, которое от геометрии зависеть не должно. Далее это обстоятельство будет проверено более подробно.

Из последней строки таблицы можно видеть, что удельные сопротивления блока в целом являются анизотропными, хотя эта анизотропия и не велика. Так, удельные сопротивления по осям Ox и Oy одинаковы, что обусловлено симметрией геометрических и электрических параметров по этим осям. Однако удельное сопротивление по оси Oz уже заметно отличается. Такое обстоятельство обусловлено тем, что в первых двух случаях ток идет вдоль слоев графена, то есть сопротивления этих слоев и промежутков между ними соединены параллельно, тогда как в третьем случае ток идет поперек слоев и эти сопротивления соединены последовательно. Дополнительным обстоятельством является различие сопротивлений слоя графена вдоль и поперек. Поэтому и удельные сопротивления блока в целом по оси Oz получается отличным от удельных сопротивлений по осям Ox и Oy . Следует заметить однако, что это различие сравнительно невелико: удельное сопротивление по оси Oz больше такового вдоль осей Ox и Oy всего в 1,5365 раз, что значительно меньше различия сопротивлений для одного слоя графена, составляющего четыре порядка. Причина такого несоответствия будет обсуждена далее.

28. Некоторые свойства модели трубок

Рассмотрим теперь некоторые свойства модели трубок. Прежде всего следует оценить ее универсальность, то есть понять, как связана ее применимость с размерами блока в целом. Для решения такой задачи воспользуемся параметрами, приведенными в таблице №1 и будем варьировать геометрические размеры блока.

На рис.9 приведены зависимости абсолютного сопротивления блока от его размера по осям. Кривая 1 соответствует изменению размера S_x при

сохранении размеров S_y и S_z как в таблице №1, кривая 2 – изменению размера S_y при сохранении S_x и S_z , кривая 3 – изменению размера S_z при сохранении S_x и S_y ,

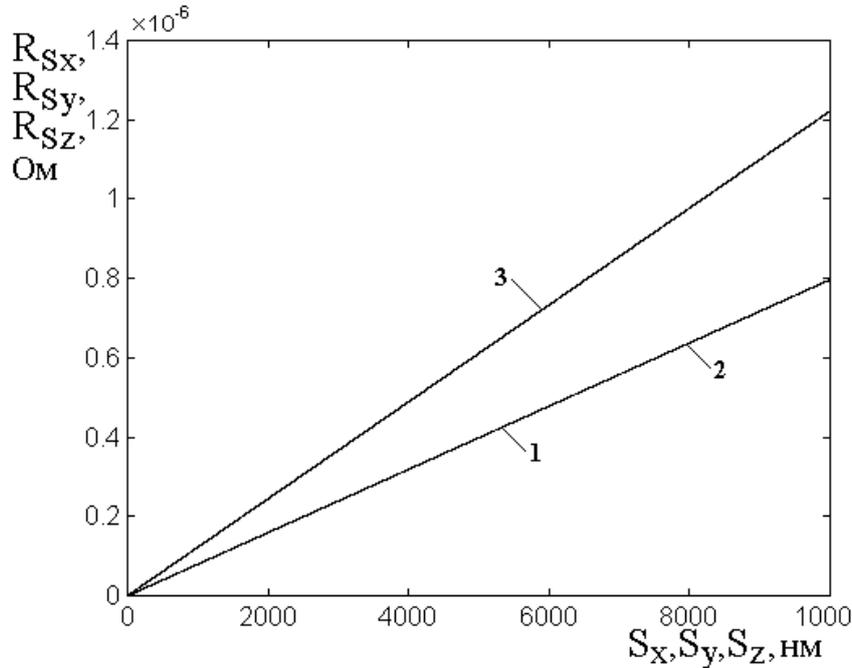


Рис.9. Зависимости абсолютного сопротивления блока от его размера по осям. 1 – ось Ox , 2 – ось Oy ; 3 – ось Oz .

Все параметры, кроме S_x, S_y, S_z – те же, что в таблице №1.

Из рисунка можно видеть, что все кривые представляют собой прямые линии, что соответствует выполнению классического закона Ома [53, 54]. Кривые 1 и 2 совпадают в силу симметричности заданных параметров. Кривая 3 проходит выше кривых 1 и 2 по той причине, что в ее формировании участвует сопротивление слоя графена поперек плоскости, которое превышает сопротивление того же слоя вдоль плоскости на четыре порядка. Заметим, что во всем интервале изменения размеров блока соотношение сопротивлений вдоль осей Ox, Oy и вдоль оси Oz сохраняется равным 1,5365, как это было отмечено в разделе №27.

Рассмотрим теперь удельное сопротивление блока, для чего обратимся к рис.10, где приведены зависимости удельного сопротивления блока от его

размера по осям. Нумерация кривых – та же, что на рис.9. Здесь, как и на рис 9, кривые 1 и 2 соответствуют изменению S_x и S_y , а кривая 3 – изменению S_z .

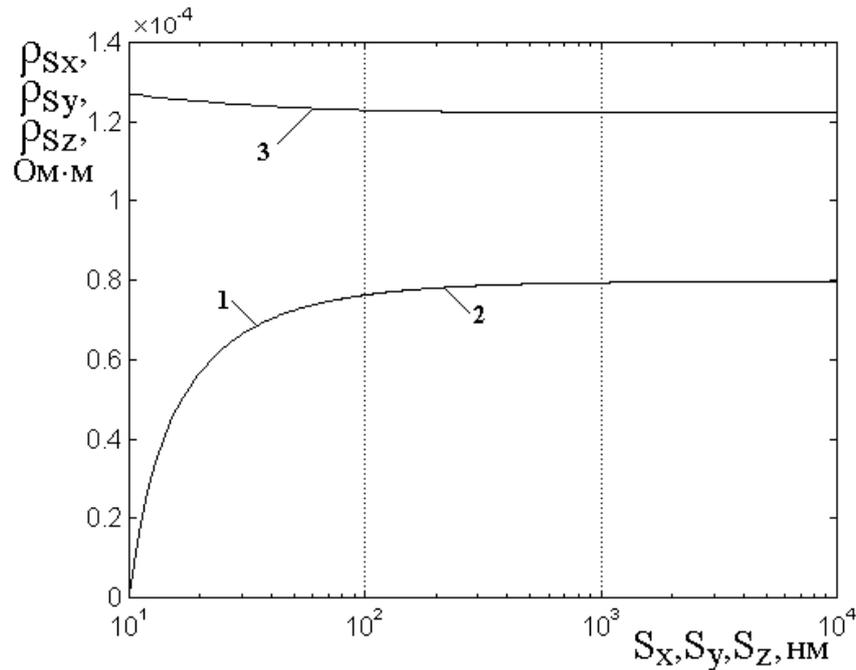


Рис.10. Зависимости удельного сопротивления блока от его размера по осям. 1 – ось Ox , 2 – ось Oy ; 3 – ось Oz .

Все параметры, кроме S_x , S_y , S_z – те же, что в таблице №1.

Из рисунка можно видеть, что при малых размерах (порядка 10-20 нм) сопротивления вдоль осей Ox и Oy (кривые 1 и 2) весьма малы, так как в их формировании участвует малое число пачек (одна-две) и сопротивление промежутков еще заметно не проявляется. В то же время, при этих же размерах сопротивления вдоль оси Oz (кривая 3) довольно велико, так как здесь опять-таки участвует малое число пачек и ток идет, в основном, перпендикулярно слоям графена, не ответвляясь на промежутки между пачками, сопротивление которых меньше. В этой области соотношение сопротивлений определяется, в основном, соотношением сопротивлений слоя графена вдоль и поперек плоскости и может достигать нескольких порядков.

Однако по мере увеличения размеров блока обе зависимости сближаются (кривые 1 и 2 идут вверх, а кривая 3 – вниз), так как при увеличении числа пачек в формировании сопротивления блока в целом начинают играть

заметную роль промежутки между пачками. В конечном счете, роль промежутков становится преобладающей настолько, что полное сопротивление блока уже определяется не столько сильно анизотропным сопротивлением слоя графена, сколько полностью изотропными сопротивлениями промежутков между пачками и трубками.

Таким образом, при размерах блока менее 100 нм (при укладывании менее пяти пачек вдоль трубки) обе зависимости имеют сильно криволинейный характер, однако, начиная с этого размера (более пяти пачек вдоль трубки), далее почти не меняются, стремясь к постоянным значениям, для кривых 1 и 2 равному $0,7971 \cdot 10^{-4}$ Ом м, а для кривой 3 равному $0,1222 \cdot 10^{-3}$ Ом м.

В силу изотропности сопротивлений промежутков, значения удельных сопротивлений блока по осям различаются мало, во всяком случае, их различие получается значительно меньшим, чем различие сопротивлений одного слоя графена, как это и было отмечено в разделе №27.

Независимость удельного сопротивления от геометрических параметров блока можно считать критерием адекватного применения рассматриваемой модели трубок. Таким образом, можно сделать вывод, что модель трубок успешно применима только в том случае, если число входящих в трубку пачек и число трубок, входящих в блок достаточно велико и составляет не менее пяти тех и других единиц. Заметим, что согласно экспериментальным данным, приведенным в работах [24, 52], это условие в реальных шунгитах, как правило, выполняется, а в графите, так выполняется просто всегда.

29. Замечание о сравнении с экспериментом

Рассмотрим, в какой степени полученные результаты могут быть соотнесены с реальными значениями удельного сопротивления, полученными в эксперименте. Согласно предложенной модели, блок представляет собой не образец в целом, а ту часть образца, которая занята углеродом, полностью исключая кварц.

Воспользуемся данными работы [50, раздел 2, таблица №2], где показано, что образец шунгита с концентрацией углерода 73% имеет удельную

проводимость равной 5200 См/м, а образец с концентрацией 97% имеет проводимость 9000 См/м. Можно полагать, что проводимость этих двух образцов достаточно близка к проводимости входящего в них углерода, так как количество углерода в них значительно превышает количество кварца. Образцы с меньшим содержанием углерода на данном этапе рассматривать не будем. Полагая, что при значительной концентрации углерода (во всяком случае, больше 70%) зависимость проводимости от концентрации достаточно близка к прямой линии [50, рис.2], приведем проводимости упомянутых образцов к концентрации в 100%. С учетом прямой пропорциональности для первого образца получаем 7123 См/м и для второго 9278 См/м. Средняя величина составляет 8200 См/м.

Будем считать это значение ориентировочно соответствующим полученной в эксперименте проводимости чистого углерода.

Теперь рассмотрим значения, полученные в рамках модели трубок. В таблице №2 (последняя строка) приведены значения удельного сопротивления равные $0,794 \cdot 10^{-4}$ Ом м и $0,122 \cdot 10^{-3}$ Ом м, что дает удельные проводимости равными 12590 и 8197 См/м. Средняя величина равна 10394 См/м.

Можно видеть, что предложенная модель отражает экспериментальное значение с точностью около 20%.

Учитывая значительную неоднородность природного материала и высокую степень идеализации структуры расчетной модели, такое согласие можно считать вполне удовлетворительным.

С другой стороны, входные параметры, приведенные в таблице №1, имеют значительную степень неопределенности, что связано с недостаточностью имеющихся в распоряжении авторов экспериментальных данных. Можно полагать, что вариация этих параметров даже в небольших пределах (не более нескольких раз) может привести к получению результатов, значительно лучше приближающихся к экспериментальным, в том числе в более широком диапазоне концентраций углерода. Реализацию такой

процедуры авторы оставляют в качестве задачи для самостоятельного исследования.

Заключение

Выполнено представление удельной проводимости графеносодержащего шунгита на основе модели трубок тока.

Отмечено, что реальные образцы природного шунгита представляют собой совокупность областей хорошо проводящего углерода, разделенных областями непроводящего кварца, причем те и другие области имеют размеры в десятки и сотни микрометров.

Установлено, что области углерода состоят из наноразмерных блоков, структура которых образована графеновыми слоями, сгруппированными в многослойные пачки.

Для анализа проводимости таких блоков предложена модель трубок, состоящих из графеновых пачек, упорядоченных по трем взаимно перпендикулярным направлениям. При этом плоскости образующих пачки слоев графена предполагаются ориентированными параллельно одной из плоскостей упорядочения. Предполагается, что электрический ток через блок может проходить только по трем взаимно перпендикулярным направлениям, совпадающим с направлениями трубок.

Отмечено, что основной задачей для модели трубок является выражение абсолютного и удельного сопротивления блока по этим направлениям через геометрические и электрические параметры трубок, графеновых пачек и слоев графена.

В качестве входных геометрических параметров задачи представлены размеры слоя графена, размеры пачки и промежутка между слоями графена внутри пачки, размеры промежутка между пачками внутри трубки, а также размеры промежутков между трубками внутри блока. В качестве входных электрических параметров задачи представлены удельные сопротивления слоя графена вдоль и поперек плоскости, а также удельные сопротивления промежутков между пачками и между трубками, которые предполагаются

изотропными. Отмечено, что полное сопротивление электрической сети из слоев графена, пачек и трубок может быть получено на основе классического представления параллельного и последовательного соединения резистивных элементов.

Рассмотрено продольное и поперечное сопротивления одного слоя графена, а также пачки, образованной несколькими слоями графена, разделенными промежутками. Показано, что сопротивление пачки вдоль слоя графена определяется параллельным соединением сопротивлений слоев графена и промежутков между ними, а сопротивление пачки поперек слоя графена определяется последовательным соединением сопротивлений слоев и промежутков. На основе рассмотрения геометрии и электрических параметров трубки показано, что сопротивление трубки формируется последовательным соединением сопротивлений пачек и промежутков между ними. На основе рассмотрения геометрических и электрических параметров блока показано, что его сопротивление формируется параллельным соединением сопротивлений трубок и промежутков между ними.

Приведены алгоритмы определения абсолютного и удельного сопротивления блока по трем координатам, состоящие в последовательности шагов расчета промежуточных параметров на основе заданных входных параметров задачи в целом.

Выполнен расчет абсолютного и удельного сопротивления блока при частном наборе входных параметров, наиболее близко соответствующих известным из эксперимента реальным параметрам шунгита. Показано, что при известном из эксперимента различии сопротивлений вдоль и поперек слоя графена на четыре порядка, различие сопротивлений блока вдоль тех же направлений составляет не более одного порядка. В качестве причины уменьшения анизотропии сопротивления блока по сравнению с анизотропией слоя графена, отмечена роль изотропного характера сопротивлений промежутков между пачками и трубками внутри блока.

Рассмотрены зависимости абсолютного и удельного сопротивлений блока от его геометрических размеров. Показано, что абсолютное значение сопротивления блока вдоль той или иной оси прямо пропорционально его размеру вдоль той же оси. Показано, что удельное сопротивление блока вдоль каждой из осей при малых размерах блока определяется удельными сопротивлениями слоя графена и пачки, а при больших размерах блока не меняется, принимая постоянное значение.

Отмечено, что критерием объективности полученного значения удельного сопротивления является его независимость от размеров блока. Показано, что для получения более или менее объективного значения удельного сопротивления размер блока должен превышать размер пачки по всем координатам не менее чем на порядок.

Отмечена некоторая недостаточность экспериментальных данных на уровне наноразмеров, вынуждающая вместо точных значений параметров использовать лишь наиболее вероятные их величины. Показано, что, несмотря на вероятностный характер задаваемых параметров, получаемое удельное сопротивление блока в целом согласуется с известными из эксперимента удельными сопротивлениями углеродной составляющей шунгита в пределах около 20%.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана грантом РФФИ: 20-55-53019 ГФЕН_а.

Литература

1. Луцев Л.В., Николайчук Г.А., Петров В.В., Яковлев С.В. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства и применение. // Нанотехника. 2008. №10. С.37-43.

2. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона. //

РЭ. 2003. Т.48. №2. С.196-209.

3. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. // Физическая инженерия поверхности. 2003. Т.1. №2. С.161-172.

4. Антонов А.С., Панина Л.В., Сарычев А.К. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо. // ЖТФ. 1989. Т.59. №6. С.88-94.

5. Виноградов А.П. Электродинамика композитных материалов. М.: УРСС. 2001.

6. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот. // ЖТФ. 2013. Т.83. №1. С.3-28.

7. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. // Phys. Rev. Lett. 2000. V.84. №18. P.4184-4187.

8. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens. // Phys. Rev. Lett. 2000. V.85. №18. P.3966-3969.

9. Мошников И.А., Ковалевский В.В., Лазарева Т.Н., Петров А.В. Использование шунгитовых пород в создании радиоэкранирующих композиционных материалов. // Материалы совещания «Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения северо-запада России. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН. 2007. С.272-274.

10. Лыньков Л.М., Махмуд М.Ш., Криштопова Е.А. Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразного шунгита. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. Новополоцк: ПГУ. 2012. №4. С.103-108.

11. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. Радиопоглощающие свойства никельсодержащего порошкообразного шунгита. // ПЖТФ. 2009. Т.35. №9. С.44-48.

12. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Криштопова Е.А. Микроволновые и оптические свойства многофункциональных экранов электромагнитного

излучения на основе порошкообразного шунгита. // Сборник трудов. 4-й международной конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Беларусь. Минск. 2009. С.23-25.

13. Борисов П.А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Карелия. 1956.

14. Филиппов М.М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 2002.

15. Соколов В.А., Калинин Ю.К., Дюккиев Е.Ф. (ред.). Шунгиты – новое углеродистое сырье. Петрозаводск: Карелия. 1984.

16. Филиппов М.М., Медведев П.П., Ромашкин А.Е. О природе шунгитов Южной Карелии. // Литология и полезные ископаемые. 1998. №3. С.323-332.

17. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E. A giant paleoproterozoic deposit of shungite in NW Russia. // Ore Geology Reviews. 2004. V.24. P.135-154.

18. Родионов В.В. Механизмы взаимодействия СВЧ-излучения с наноструктурированными углеродсодержащими материалами. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Курск. 2014.

19. Emelyanov S.G., Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Dobromyslov M.V. Mechanisms of microwave absorption in carbon compounds from shungite. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2013. V.5. №4. P.04023-1 04023-3.

20. Кузьменко А.П., Родионов В.В., Харсеев В.А. Гиперфуллереновые углеродные нанобразования как порошковый наполнитель для поглощения СВЧ-излучения. // Нанотехника. 2013. №4. Выпуск 36. С.35-36.

21. Kuzmenko A.P., Rodionov V.V., Emelyanov S.G., Chervyakov L.M., Dobromyslov M.V. Microwave properties of carbon nanotubes grown by pyrolysis of ethanol on nickel catalyst. // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2014. V.6. №3. P.03037-1 03037-2.

22. Бойправ О.В., Айад Х.А.Э., Лыньков Л.М. Радиоэкранирующие свойства никельсодержащего активированного угля. // ПЖТФ. 2019. Т.45. №12. С.52-54.

23. Савенков Г.Г., Морозов В.А., Украинцева Т.В., Кац В.М., Зегря Г.Г., Илюшин М.А. Влияние добавок шунгита на электрический пробой перхлората

аммония. // ПЖТФ. 2019. Т.45. №19. С.44-46.

24. Голубев Е.А., Антонец И.В., Щеглов В.И. Модельные представления микроструктуры, электропроводящих и СВЧ-свойств шунгитов. Сыктывкар: Изд.СыктГУ. 2017.

25. Golubev Ye.A., Antonets I.V., Shcheglov V.I. Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials. // Materials Chemistry and Physics. 2019. V. 226. №3. P.195-203.

26. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // ПЖТФ. 2018. Т.44. №9. С.12-18.

27. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование проводимости графеносодержащего шунгита волноводным методом. // Сборник трудов Международного симпозиума «Перспективные материалы и технологии». Витебск: Беларусь. 2017. С.6-9.

28. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // Сборник трудов конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах». Институт физики Дагестанского научного центра РАН. Махачкала. 2017. С.432-436.

29. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Динамическая проводимость графеносодержащего шунгита в диапазоне сверхвысоких частот. // Сборник трудов XXV Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.135-147.

30. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Влияние подложки на отражающие и пропускающие свойства двухслойной проводящей структуры. // Сборник трудов XXV Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.166-182.

31. Ковалевский В.В. Структура углеродного вещества и генезис шунгитовых пород. // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Петрозаводск. 2007.

32. Шека Е.Ф., Голубев Е.А. О техническом графене – восстановленном оксиде графена – и его природном аналоге – шунгите. // ЖТФ. 2016. Т.86. №7. С.74-80.

33. Голубев Е.А., Уляшев В.В., Велигжанин А.А. Пористость и структурные параметры шунгитов Карелии по данным малоуглового рассеяния синхротронного излучения и микроскопии. // Кристаллография. 2016. Т.61. №1. С.74-85.

34. Морозов С.В., Новоселов К.С., Гейм А.К. Электронный транспорт в графене. // УФН. 2008. Т.178. №7. С.776-780.

35. Hill E.W., Geim A.K., Novoselov K., Schedin F., Blake P. Graphene spin valve devices. // IEEE Trans. Magn. 2006. V.42. №10. P.2694-2696.

36. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Влияние структурных параметров шунгита на его электропроводящие свойства. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/11/text.pdf>.

37. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Модельное представление микроструктуры, проводимости и СВЧ свойств графеносодержащего шунгита. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/8/text.pdf>.

38. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Модельное представление микроструктуры шунгита в связи с его электропроводящими свойствами. // Сборник трудов XXV Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.148-165.

39. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение модели двухкомпонентной среды для оценки электрической проводимости шунгита. // Сборник трудов XXV Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.183-193.

40. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение электросиловой спектроскопии для геометрического моделирования структуры шунгита. // Сборник трудов XXV Международной конференции

«Электромагнитное поле и материалы». М.: НИУ МЭИ. 2017. С.194-206.

41. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных свойств графеносодержащего шунгита по данным рентгеноспектрального элементного анализа. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/1/text.pdf>.

42. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Применение гармонического анализа данных рентгеновской спектроскопии для изучения структуры графеносодержащего шунгита. // Сборник трудов XXVII Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: НИУ МЭИ. 2019. С.227-237.

43. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Дискретная модель интегральной проводимости графеносодержащего шунгита. // Сборник трудов XXVII Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: НИУ МЭИ. 2019. С.238-245.

44. Макеева Г.С., Голованов О.С., Ринкевич А.Б. Вероятностная модель и электродинамический анализ резонансного взаимодействия электромагнитных волн с 3D-магнитными нанокompозитами. // РЭ. 2014. Т.59. №2. С.152-158.

45. Голованов О.А., Макеева Г.С., Ринкевич А.Б. Взаимодействие электромагнитных волн с периодическими решетками микро- и нанолент графена в терагерцовом диапазоне. // ЖТФ. 2016. Т.86. №2. С.119-126.

46. Макеева Г.С., Голованов О.А. Математическое моделирование электронноуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок. Пенза: Изд. ПГУ. 2018.

47. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Структурные и электрические свойства графеносодержащего шунгита на основе анализа карт проводимости. // Сборник трудов XXVI Международной конференции

«Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: ИНФРА-М. 2018. С.293-302.

48. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 1. Концентрация углерода. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018, №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/5/text.pdf>.

49. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 2. Дискретность структуры. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018, №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/6/text.pdf>.

50. Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Исследование структурных и электрических свойств графеносодержащего шунгита по данным электросиловой спектроскопии. Часть 3. Удельная проводимость. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/1/text.pdf>.

51. Гоулдстейн Д., Яковиц Х. (ред.). Практическая растровая электронная микроскопия. М.: Наука. 1978.

52. Дмитриев А.В. Научные основы разработки способов снижения удельного электрического сопротивления графитированных электродов. Челябинск: Изд.ЧГПУ. 2005.

53. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука. 1964.

54. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3. Электричество. М.: Наука. 1977.

Для цитирования:

Антонец И.В., Голубев Е.А., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Представление удельной проводимости графеносодержащего шунгита на основе модели трубок тока. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/7/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.7