

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Азарова Елизавета Павловна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение электрической проводимости твердой диэлектрической
среды (стекло)**

Практикум электричества и магнетизма, 2 курс, группа № 18301

Научный руководитель:

д.ф-м.н., с.н.с. Хасанов Т. Х.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Судников А. В.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

Работа посвящена изучению электропроводимости в твердом диэлектрике.

Рассмотрены методы определения электрической проводимости диэлектрического твердого тела в цепях постоянного и переменного тока. А также метод измерения оптических параметров среды с помощью эллипсометрии.

Экспериментальным путем показано, что для данного образца лучшим методом измерения искомых параметров является эллипсометрия.

Произведена численная оценка значения диэлектрической проницаемости и удельной проводимости материала исследуемого образца.

Ключевые слова: проводимость, удельная проводимость, электропроводности, диэлектрик, диэлектрическая проводимость, конденсатор, диэлектрическое твердое тело, эллипсометрия.

Оглавление

Аннотация	2
Введение	4
Теоретическая часть	5
1. Постоянный ток в твердом теле.	5
2. Проводимость диэлектриков в разных условиях.	6
3. Эллипсометрия.....	10
3.1 Определение диэлектрической проницаемости с помощью эллипсометра.	10
Экспериментальная часть	12
Обсуждение результатов	15
Вывод	16
Список литературы	17

Введение

Изучение свойств твердого тела является актуальной задачей, так как бурное развитие различных отраслей: микроэлектроники, робототехники, приборостроения и др., ставят перед учеными цель – найти подходящие материалы для реализации различных проектов.

Одно из свойств, которое можно выделить в твёрдых телах – это их способность проводить электрический ток. Выделяют три основные группы: проводники, полупроводники, диэлектрики-изоляторы. Но это разделение не означает, что диэлектрики-изоляторы не способны проводить электрический ток, даже если количество свободных носителей заряда в много раз меньше, чем в проводящих материалах. Также их проводимость во многом зависит от внешних факторов: температуры, напряженности электрического поля и др. Разные диэлектрики по своим характеристикам подходят для разных задач. Поэтому изучение электропроводимости твердого диэлектрика представляет большой интерес для схемотехники и радиоэлектроники, и т.д.

Целью данной курсовой работы является изучение и определение (измерение) электрической проводимости в твердых диэлектрических средах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Ознакомиться с различными методами измерения проводимости, в том числе и с эллипсометрией.
2. Выбрать подходящий метод измерения проводимости неизвестного образца.
3. Определить численное значение электрической проводимости неизвестного образца.

Теоретическая часть

1. Постоянный ток в твердом теле.

Упорядоченное движение заряженных частиц называется электрическим током. В твёрдом теле электрический ток возникает под действием электрического поля. Величина электрического тока зависит от концентрации свободных носителей заряда, и равна она отношению пройденного заряда через рассматриваемую поверхность в единицу времени.

В девятнадцатом веке Георг Симон Ом экспериментально установил закон зависимости силы тока от напряжения на участке цепи. Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению данного участка цепи.

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Где R – это сопротивление проводника.

Также закон Ома можно записать в дифференциальной форме. Выделим в окрестности некоторой точки внутри проводника элементарный

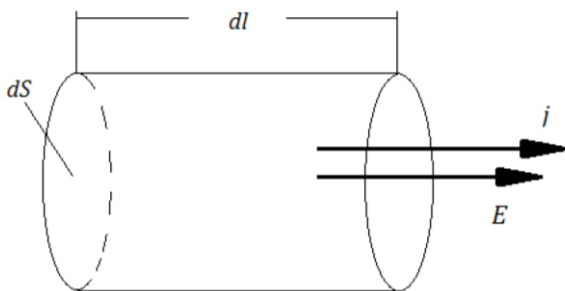


Рис. 1. Выделенный объём с плотностью тока j

цилиндрический объём (рис. 1) с образующими, параллельными вектору плотности тока j в данной точке. Через поперечное сечение цилиндра течет ток – $j dS$. Напряжение, приложенное к цилиндру, равно $E dl$, где E - напряженность поля в данном месте.

Возьмем сопротивление цилиндра равное $\rho \frac{dl}{dS}$, где ρ – удельное сопротивление проводника. Подставим эти значения в формулу из закона Ома (1)

$$j dS = \frac{dS}{\rho dl} E dl$$

$$j = \frac{E}{\rho} = \sigma E \quad (2)$$

Получившаяся формула (2) выражает закон Ома в дифференциальной форме. Где σ – величина, называемая удельной проводимостью материала или просто проводимостью материала. То есть проводимость - это способность вещества проводить ток [1]. Из дифференциальной формы закона Ома можно определить размерность проводимости в СИ, которая обратно пропорциональна размерности удельного сопротивления: [$\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$].

2. Проводимость диэлектриков в разных условиях.

Определив, что ток пропорционален проводимости материала, можно условно разделить все твердые тела по их способности проводить ток.

Проводники – вещества, которые хорошо проводят электрический ток. Яркими представителями этого класса являются металлы. При повышении температуры их сопротивление растет, связано это с колебаниями ионов в узлах кристаллической решетки. С понижением температуры наоборот, проводимость металла увеличивается.

Полупроводники – вещества, занимают промежуточную позицию между проводниками и диэлектриками. Проводимость полупроводника во много зависит от его состава и внешних условий.

Твердые диэлектрики – вещества, плохо или совсем не проводящие ток материалы, так как содержание носителей зарядов, очень мало. Также диэлектрики обладают способностью поляризоваться во внешнем электрическом поле E .

Однако деление веществ на проводники и полупроводники условно. Диэлектрики также способны проводить электрический ток, правда, их электропроводность крайне мала [2], тогда какими способами можно определить проводимость диэлектрика?

Рассматривая диэлектрик в цепи постоянного тока, мы не сможем зарегистрировать ток, проходящий через него: количество свободных

электронов настолько мало что ток не возникнет или возникнет такой, что его будет сложно обнаружить измерительными приборами.

Но один из способов пустить ток через диэлектрик в цепи постоянного тока: при огромных напряжениях, тогда возникнет электрический пробой. Однако при этом явлении нарушается строение самого диэлектрика, отсюда и изменение его проводимости. Поэтому при увеличении электрического поля не получится измерить электропроводность σ . [3]

Можно заключить, что в цепях постоянного тока диэлектрик ведет себя как разрыв цепи или огромное сопротивление. А что будет происходить с ним в цепях переменного тока?

Следует начать с определения конденсатора, которые используют в данных цепях. Конденсатор – это устройство, способное накапливать электрический заряд. Величина накопленного заряда пропорциональна емкости конденсатора C , зависящей от конкретной его конструкции. Связь между напряжением U , зарядом q и емкостью C выражается следующим соотношением:

$$q = CU \quad (3) \quad (\text{СИ, СГС})$$

Дифференцируя это соотношение по времени, получаем линейную связь между током и напряжением в цепи с емкостью:

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

А определение емкости C через геометрические размеры:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{СИ}) \quad C = \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{S}{d} \quad (\text{СГС})$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды (диэлектрика) между пластинами.

В цепях переменного (синусоидального) тока $U = U_0 e^{i\omega t}$, $I = I_0 e^{i\omega t}$, из уравнения (4) получаем

$$I_0 = C i\omega U_0 = \frac{U_0}{Z_c}$$

и конденсатор может быть рассмотрен как частотно-зависимый резистор с сопротивлением [4]:

$$Z_c = \frac{1}{i\omega C} = \frac{1}{2i\pi\nu C}$$

где ν – частота подаваемых импульсов, C – ёмкость конденсатора. Отсюда можно сказать, что проводимость конденсатора с исследуемым диэлектриком напрямую зависит от частоты в цепи и его собственной ёмкости.

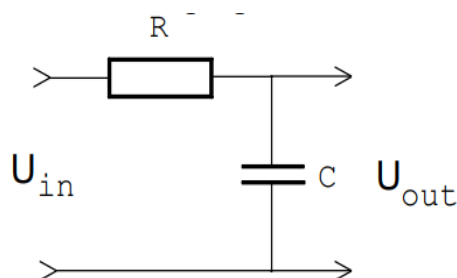


Рис. 2. Схема фильтра низких частот.

Чтобы определить ёмкость конденсатора с неизвестным диэлектриком, можно собрать схему фильтра низких частот (рис. 2), где сигнал на выходе можно записать как [4]

$$U_{out} = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} U_{in}$$

Зная U_{in} , U_{out} , и нагрузочное сопротивление R ,

можно выразить Z_c

Так, можно получить диэлектрическую проницаемость вещества, которая зависит частоты. Однако мы не сможем напрямую оценить проводимость диэлектрика.

Поставленную задачу можно решить с помощью оптических методов. Но сначала следует разобрать поведение света в однородной среде. Свет ведет себя одновременно как электромагнитная волна и поток фотонов. Электромагнитная волна – это явление взаимных превращений электрического и магнитного полей, распространяющихся от точки к точке. [1]

Из уравнений Максвелла для однородной среды с постоянными проницаемостями ϵ и μ (следующие уравнения и преобразования представлены в системе СГС). В этом случае:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} &= \mu \frac{\partial H}{\partial t} & \frac{\partial D}{\partial t} &= \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \\ \text{rot } H &= \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t} & \text{rot } E &= -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \\ \text{div } H &= 0 & \text{div } E &= 0 \end{aligned}$$

Применим оператор *rot* к третьей строке уравнений и выполним некоторые преобразования:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} E) = -\frac{\mu}{c} \operatorname{rot}\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)$$

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} E) - \Delta E = -\frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\Delta E = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Аналогично для *rot H*:

$$\Delta H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

Получившиеся уравнения неразрывно связаны друг с другом, и эти же уравнения удовлетворяют волновому уравнению.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

Таким образом, электрическое и магнитное поле могут существовать в виде электромагнитных волн, фазовая скорость которых равна: [1]

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

выразив через показатель преломления среды *N*

$$N^2 = \varepsilon\mu$$

Также можно воспользоваться зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости [5]

$$\varepsilon = N^2 = \varepsilon_{\text{действ}} - i \frac{\sigma}{2\pi\nu\varepsilon_0}$$

где ε_0 — электрическая постоянная; $\varepsilon_{\text{действ}}$ — диэлектрическая проницаемость среды, σ — электропроводность среды. Здесь учтено, что практически для всех веществ в области оптических частот с очень хорошей точностью можно принять $\mu = 1$ [6]

Можно определить диэлектрическую проницаемость вещества, а из нее определить интересующую удельную проводимость вещества с помощью одной наиболее точных методик – эллипсометрии.

3. Эллипсометрия

В 1980 г. было дано определение термину «эллипсометрия» – он обозначает «оптическую методику исследования состояния поверхности и определения (измерения) параметров тонких пленок, основанную на анализе изменения, состояния поляризации светового пучка при отражении» [7]. Теперь хорошо известно, что эллипсометрия позволяет измерять не только поверхностные пленки, но и значения оптических констант изотропных и анизотропных сред, соответствующих объемным материалам [8].

3.1 Определение диэлектрической проницаемости с помощью эллипсометра.

В эллипсометрии реально измеряется состояние эллипса поляризации до и после отражения. Отношение эллипса поляризации падающей и отраженной волны характеризует свойство отражающей системы. При отражении от любой изотропной отражающей системы комплексное отношение отражающей системы ρ определяется из выражения [8]:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = tg\Psi \exp(i\Delta) \quad (1),$$

где R_p , R_s - комплексные амплитудные коэффициенты отражения для света, поляризованного в плоскости падения (p- направление) и перпендикулярно ей (s-направление).

Углы Ψ и Δ , характеризующие относительный коэффициент отражения, обычно называют поляризационными углами отражающей системы или эллипсометрическими параметрами, а уравнение (1) – основным уравнением эллипсометрии.

Пусть от границы раздела внешняя среда – полубесконечная изотропная среда (в общем случае поглощающая), в которой отражается поляризованная волна. В этом случае решение основного уравнения эллипсометрии (1)

относительно диэлектрической проницаемости (или показателей преломления и затухания) однородной полубесконечной среды является аналитическим и находится из следующего выражения (2):

$$\sqrt{\varepsilon} = N = n - ik = N_0 \operatorname{tg} \varphi \left[1 - \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \operatorname{Sin}^2 \varphi \right]^{1/2} \quad (2),$$

где φ – угол падения светового пучка на отражающую систему; N_0 – показатель преломления внешней среды (для воздуха принято считать его значение равным единице); n и k - показатели преломления и затухания, соответственно.

Экспериментальная часть

Для исследования был взят образец стекла цилиндрической формы:

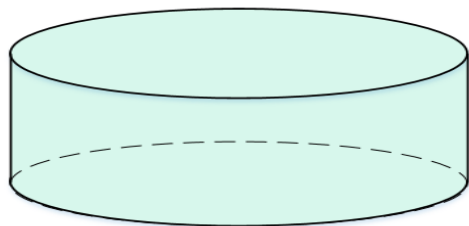


Рис. 3. Внешний вид образца

Радиус равен $r = 11,1$ см

Высота $h = 1,52$ см

Оценив ёмкость конденсатора через его геометрические размеры,

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

где ёмкость равна порядку величины \approx

10^{-12} Ф, без подстановки диэлектрической проницаемости исследуемого вещества.

Была проведена проверка проводимости твердого диэлектрика в цепи постоянного тока. Как и ожидалось, прохождение тока зафиксировать не получилось.

Подключив исследуемый образец в цепь переменного напряжения к низкочастотному генератору ГЗ-118 – измерить напряжение на выходе с помощью чувствительного вольтметра Б7-76 не получилось. Ёмкость предоставленного образца слишком мала для измерений, а выделить из образца образец меньших размеров (например, путем тщательной полировки) не представляется возможным. Следовательно, измерить диэлектрическую проницаемость не получится.

Переходя к оптическому методу измерений, стоит сказать, что измерения поляризационных углов ψ и Δ проводились на модифицированном эллипсометре ЛЭФ-2. Принципиальная оптическая схема прибора приведена на рис. 4.

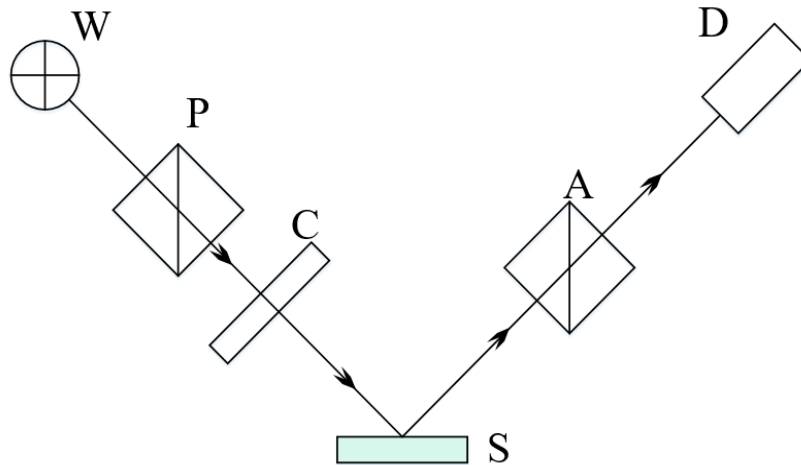


Рис. 4. Принципиальная схема эллипсометра. W – источник излучения, P – поляризатор, C – компенсатор, S – исследуемый объект, A – анализатор, D – фотоприемник

Использовалась нулевая методика измерения при двух ориентациях компенсатора, то есть по четырех зонной методике:

$$\Delta^{1,2} = -(P_1 + P_2 - R) + 2l\pi$$

$$\Delta^{3,4} = P_3 + P_4 - R + 2l\pi$$

$$\psi^{1,2} = \frac{A_1 - A_2}{2},$$

$$\psi^{3,4} = \frac{A_3 - A_4}{2}$$

Здесь $\Delta_{1,2}$, $\Psi_{1,2}$ и $\Delta_{3,4}$, $\Psi_{3,4}$ значения поляризационных углов в первой, второй и третьей, четвертой измерительных зонах соответственно. P_j и A_j ($j = 1, 2, 3, 4$) углы гашения поляризатора и анализатора в соответствующих измерительных зонах.

Приступая к работе, поверхность образца была обработана обезжиривающими средствами. На эллипсометре был выставлен угол падения $\varphi = 70^\circ$, образец помещен на предметный столик. Проведено одно четырехзонное измерение.

Полученные данные занесены в таблицу 1.

Таблица 1. Значения углов четырех зон A_j, P_j . Значения поляризационных углов ψ и Δ , показатель преломления n , показатель затухания k

	A_1	P_1	A_2	P_2	A_3	P_3	A_4	P_4
Углы с лимбов	196°46'	218°19'	163°42'	127°55'	196°55'	232°05'	163°40'	141°44'
$\psi_{1,2}$	16°32'				16°37'			
$\Delta_{1,2}$	13°46'				13°53'			
n	1,693				1,691			
k	-0,183				-0,185			

показатели преломления и затухания n и k в формуле были найдены по формуле (2) и также предоставлены в таблице 1.

$$\sqrt{\varepsilon} = N = n - ik = N_0 \operatorname{tg} \varphi \left[1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \operatorname{Sin}^2 \varphi \right]^{1/2} \quad (2),$$

По данным из таблицы 1, можно сказать, что значения n_j и k_j отличаются в третьем знаке после запятой. Точности до двух знаков после запятой хватает для следующих оценок. Поэтому дальнейшие вычисления приводились по усредненным углам поляризации ψ и Δ .

Получившаяся комплексная диэлектрическая проницаемость равна:

$$\varepsilon = 2,83 - i0,62$$

Вспоминая вид комплексной диэлектрической проницаемости, можно из мнимой части выразить проводимость σ

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{дейст}} - i \frac{\sigma}{2\pi\nu\varepsilon_0}$$

$$\frac{\sigma}{2\pi\nu\varepsilon_0} = 0,620$$

Для лазера красного света с частотой $\nu \approx 430 * 10^{12}$ Гц, $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$,

проводимость приблизительно равна:

$$\sigma = 14,8 * 10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$$

Обсуждение результатов

Для исследуемого образца была получена комплексная диэлектрическая проницаемость равная:

$$\varepsilon = 2,83 - i0,62$$

Действительная часть которой является диэлектрической проницаемостью самого вещества. Численное значение сравнимо с табличным ($\varepsilon_{\text{табл}} \approx 3,8$) [9]. Однако получившаяся проводимость сильно отличается от табличной ($\sigma_{\text{табл}} \approx 10^{-7}$). Полученное большое значение мнимой части диэлектрической проницаемости обусловлено не учтенной наличием пленки на поверхности объекта исследования. Наличие пленки связано с химическими свойствами самих стекол, независимо от шлифовки и полировки будет возникать тонкий поверхностный слой, влияние которого будет сказываться на расчет поляризационного угла Δ . [10]

Вывод

Было экспериментально установлено, что определить значение диэлектрической проницаемости данного образца можно наиболее точно с помощью эллипсометрии.

Была достаточно точно определена диэлектрическая проницаемость исследуемого объекта (стекла) с помощью эллипсометра ЛЭФ-2. Однако проводимость данным методом определить невозможно из-за химических свойств образца.

Список литературы

1. И. В. Савельев Курс общей физики. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. / 2-е изд., перераб. - М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1982. — 496с
2. Губкин А. Н. Физика Диэлектриков Учебное пособие для вузов / Москва «Высшая школа» 1971. – 272с
3. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков / Киев: Высшая школа. Главное изд-во, 1980. — 400 с
4. Л. Н. Вячеславов, В. Л. Курочкин, В.Б.Рева, Л.Н. Смирных Электрические цепи / Новосиб.гос.ун-т, 2008. - 127 с.
5. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Семененко А. И., Семененко Л. В., Соколов В. К. Основы эллипсометрии/Новосибирск «Наука» 1978. – 424с
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в 10 томах. Том 8. Электродинамика сплошных сред / 2-е изд., перераб. и доп. - М.; Наука. Гл. ред. физ. -мат. лит. 1982. - 621 с.
7. Хасанов Т. Х. / Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9. № 1. С. 39.
8. Пшеницын В.И., Абаев М.И., Лызлов Н.Ю. Эллипсометрия в физико–химических исследованиях. Л.: Химия. 1986. 151 с.
9. Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru
10. Хасанов Т. Х. Оптика и спектроскопия 2015, том 118, № 4, с. 684–692