

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Муратов Владислав Игоревич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Диэлектрическая проницаемость и ее определение

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Хасанов Т.Х.

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2019 г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

« _____ » _____ 2019 г.

Новосибирск 2019 г.

Аннотация

В работе всесторонне рассмотрено понятие диэлектрической проницаемости, проанализированы общепринятые системы единиц – их построение, принципиальные различия, преимущества и недостатки. Были проведены измерения диэлектрической проницаемости неизвестного вещества электрическим и оптическим методами. Оптический метод основан на эллипсометрии. В электрическом методе использовалась схема с конденсатором, с помощью которого измерялась диэлектрическая проницаемость. По результатам измерений было обнаружено соответствие полученных и литературных данных.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, системы единиц, конденсатор, эллипсометрия.

Оглавление

Введение	4
Теоретическая часть	4
Диэлектрическая проницаемость	4
Системы единиц	6
Комплексная диэлектрическая проницаемость. Зависимость от частоты	9
Описание установок и методики измерений	10
Электрический метод измерений	10
Оптический метод измерений.....	11
Результаты измерений	13
Обработка и анализ результатов	14
Выводы	15
Список литературы	16

Введение

Диэлектрическая проницаемость – один из основных параметров, характеризующих электрические свойства вещества. Он определяет степень поляризуемости. Значение диэлектрической проницаемости является очень важным параметром при разработке и проектировании огромного количества электронных приборов. От ее значения зависят будущие размеры и электрические характеристики. В особенности величина диэлектрической проницаемости важна для конденсаторов, которые присутствуют практически во всех современных радиоэлектронных устройствах. Эту величину учитывают и при разработке электрических схем (особенно в высокочастотной электронике), а также интегральных микросхем.

Следует отметить, что сама по себе диэлектрическая проницаемость имеет глубокий физический смысл, требующий рассмотрения с различных позиций. Это и является главной целью данной работы.

Теоретическая часть

Диэлектрическая проницаемость

1. Пусть напряженность между двумя заряженными пластинами в вакууме равно E_0 . Когда промежуток заполнен какими-нибудь диэлектриком, электрические заряды, появившиеся на границе диэлектрика с проводником, вследствие поляризации, нейтрализуют действие частиц зарядов на пластинах. В результате этого, поле между пластинами изменяется – напряженность E становится меньше, чем E_0 . Опыт показывает, что, если последовательно заполнять промежуток между пластинами разными диэлектриками, то величины напряженности электрического поля оказываются разными. То есть, диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз напряженность поля данных зарядов в диэлектрике будет меньше, чем в вакууме.

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad (1)$$

Вычисляя силу, действующую на заряженное тело в жидком или газообразном диэлектрике, нужно также учитывать, возникающие на границе с телом механические силы натяжения в диэлектрике. Это приводит к появлению дополнительной механической силы, действующей на тело. Используя соотношение (1), несложно получить выражение для напряженности поля, создаваемого в однородном безграничном диэлектрике точечным зарядом [1].

$$E = \frac{q}{\varepsilon r^2}$$

Тогда, закон Кулона будет выглядеть следующим образом

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \quad (2)$$

Значит диэлектрическая проницаемость среды ϵ также показывает, во сколько раз сила взаимодействия F электрических зарядов в данной среде меньше, чем сила F_0 взаимодействия зарядов в вакууме, т.е. $\epsilon = \frac{F_0}{F}$.

Очень часто формулу (2) называют «самым общим выражением закона Кулона», но это, вообще говоря, не совсем верно. В связи с этим приведем следующие слова Р. Фейнмана: «Во многих старых книгах по электричеству начинается с «основного» закона, по которому сила действующая на заряды есть $F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$, а эта точка зрения абсолютно неприемлема. Во-первых, это не всегда верно; это справедливо только в мире, заполненном жидкостью; во-вторых, так получается для постоянного значения ϵ , что для большинства реальных материалов выполняется приближенно» [2].

2. Для количественного описания диэлектрика используют вектор поляризации \mathbf{P} . Он является дипольным моментом единицы объема диэлектрика, возникающим при его поляризации.

Влияние диэлектрика на электрическое поле сводится к действию поляризационных зарядов:

$$\oint E_n dS = 4\pi(q + q_{\text{пол}}). \quad (3)$$

Заряд, смещенный через площадку dS в отрицательном направлении нормали, в диэлектрике равен $q_{\text{пол}} = -\oint(\mathbf{P} d\mathbf{S})$, тогда формула (3) преобразуется:

$$\oint (E_n + 4\pi P_n) dS = 4\pi q.$$

Полученную формулу чаще пишут в виде:

$$\oint D_n dS = 4\pi q,$$

где \mathbf{D} - вектор электрической индукции:

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}.$$

Для широкого класса диэлектриков связь между векторами \mathbf{P} и \mathbf{E} линейна и однородна. Такая закономерность объясняется тем, что напряженности макроскопических электрических полей обычно очень малы по сравнению с напряженностями микрополей внутри атомов и молекул.

$$\mathbf{P} = a\mathbf{E},$$

где a – безразмерный коэффициент, называемый поляризуемостью диэлектрика, зависящий от плотности и температуры диэлектрика. Связь между \mathbf{D} и \mathbf{E} записывается в виде

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E},$$

где ε – это диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = 1 + 4\pi a \quad (4)$$

В этом случае распределение потенциала проводника также описывается уравнением Лапласа $\Delta\varphi = 0$ с граничным условием на постоянство φ на поверхности. Значит задача об электростатическом поле заряженного проводника, погруженного в однородную изотропную диэлектрическую среду, отличается от случая поля проводника в пустоте лишь формальными заменами потенциалов и зарядов: $\varphi \rightarrow \varepsilon \cdot \varphi$, $q_{\text{св}} \rightarrow q$, где $q_{\text{св}}$ – суммарный связанный заряд системы.

$$E_n = -\frac{\partial\varphi}{\partial n} = 4\pi\sigma_{\text{св}} \rightarrow D_n = -\varepsilon \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial n} = 4\pi\sigma$$

При заданных зарядах проводников потенциал и напряженность поля убывают в ε раз по сравнению с их значениями в пустоте. Это может быть наглядно объясняется как результат частичной экранировки заряда проводника поверхностными зарядами прилегающего к нему поляризованного диэлектрика. Если же поддерживаются постоянными потенциалы проводников, то поле остается неизменным, но увеличиваются в ε раз заряды проводников. Отсюда, также, следует, что при заполнении конденсатора диэлектриком, его емкость увеличится в ε раз [4].

Однако, область применимости этих соотношений ограничена. Существуют диэлектрики, к которым они неприменимы. В кристаллах, к примеру, возникает тензор диэлектрической проницаемости.

3. В электродинамике, как ни в одном другом разделе физики, важен выбор системы единиц. Этот факт не мог не затронуть понятие диэлектрической проницаемости. В разных системах единиц диэлектрическая проницаемость записывается по-разному. Описание этих систем будет представлено в следующем пункте.

Системы единиц

1. Система СГС была разработана на основе законов Ньютона, за основные величины приняты длина (сантиметр), масса (грамм), время (секунда). Уравнения Максвелла, выражающие все принципы электродинамики,

получили признание лишь в конце 19 века. До этого времени уже получили широкое распространение: вольт, ампер, ом и их производные, никак не связанные с системой единиц в механике. Системы единиц, которые рассматривают электрические и магнитные величины как производные механических называются абсолютными. К таким системам относится и СГС.

В международной системе единиц (СИ), к трем механическим величинам – длине (метр), времени (секунда) и массе (килограмм) добавлена четвертая, чисто электрическая величина, имеющая самостоятельную размерность. Такой величиной выбрана сила электрического тока, а ее единица - ампер. «Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и малой площади сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7} \text{Н}$ ». Уравнения Максвелла в СИ записываются в рационализированной форме, т.е. в форме, не содержащей никаких числовых множителей, а также опускается и размерная величина электродинамическая постоянная c .

Связь с механикой в СИ устанавливается посредством силовых векторов \mathbf{E} и \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} . Важно заметить, что размерность всех четырех векторов \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} разные.

$$[\mathbf{E}] = \text{Н/Кл} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}^3} = \text{В/м}; \quad [\mathbf{D}] = \text{Кл/м}^2 = \text{А} \cdot \text{с/м}^2;$$

$$[\mathbf{H}] = \text{А/м}; \quad [\mathbf{B}] = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \text{Тл}$$

Даже в вакууме векторы \mathbf{E} и \mathbf{D} , \mathbf{H} и \mathbf{B} в СИ имеют разные размерности, они связаны соотношениями

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H},$$

где ϵ_0 и μ_0 электрическая и магнитная постоянные соответственно. Тогда, используя закон Кулона и теорему о циркуляции, можно получить значения этих постоянных:

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \text{Г/м}$$

Эти коэффициенты связаны соотношением:

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2},$$

где c – электродинамическая постоянная [3].

Последнее соотношение является очень важным с исторической точки зрения. В 19 веке Максвелл обнаружил, что электродинамическая постоянная совпадает со скоростью света в вакууме. Весьма вероятно, что именно это дало ему основание предположить, что свет – электромагнитная волна.

В СИ диэлектрическая проницаемость представлена в двух вариациях: абсолютная и относительная. Относительная диэлектрическая проницаемость уже упоминалась в одном из прошлых пунктов. Она определяется формулой (4) и зависит только от свойств вещества, имея в любой системе единиц одинаковое значение. Абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика - величина, равная произведению его относительной диэлектрической проницаемости ε и электрической постоянной ε_0 . Электрическая постоянная зависит только от выбора системы единиц. Так как ε - величина безразмерная, то абсолютная диэлектрическая проницаемость выражается в тех же единицах, что и электрическая постоянная.

$$\varepsilon_A = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$$

2. В системе СГСМ магнитная постоянная μ_0 безразмерна и равна 1, а электрическая постоянная $\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$. В этой системе нефизические коэффициенты отсутствуют в формуле закона Ампера. В результате, единицей силы тока является $[I] = \text{дин}^{\frac{1}{2}}$.

В СГСЭ электрическая постоянная ε_0 безразмерна и равна 1, магнитная постоянная $\mu_0 = \frac{1}{c^2}$, где c — скорость света в вакууме. В этой системе закон Кулона в вакууме записывается без дополнительных коэффициентов: $F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$, в результате единица заряда должна быть выбрана как квадратный корень из единицы силы ($\text{дин}^{\frac{1}{2}}$), умноженный на единицу расстояния (сантиметр).

В симметричной СГС (называемой также смешанной СГС или Гауссовой системой единиц) магнитные единицы (магнитная индукция, магнитный поток, магнитный дипольный момент, напряженность магнитного поля) равны единицам системы СГСМ, электрические (включая индуктивность) — единицам системы СГСЭ. Магнитная и электрическая постоянные в этой системе единичные и безразмерные: $\mu_0 = 1, \varepsilon_0 = 1$.

3. Вопрос о выборе системы единиц уже долгое время остается открытым. Однако некоторые вещи уже можно сказать однозначно.

Законодательство и стандарты многих стран рекомендуют использование в науке и образовании международной системы единиц (СИ). Однако, несмотря на удобство практических измерений, в СИ имеется ряд несоответствий, что больше всего проявляется в электродинамике. Основной

проблемой является различность размерностей напряженностей и индукций электрического и магнитного полей. При этом, данная проблема полностью отсутствует в системе СГС. Несмотря на это, при рассмотрении теории цепей фактическим стандартом является СИ. Среди научного сообщества гораздо более сильны именно позиции СГС, являющейся стандартом для научных публикаций и учебников по теоретической физике. Аналогичные предпочтения наблюдаются не только у классиков науки, но, например, у современных преподавателей и студентов НГУ.

Этой проблеме посвящена статья Д.В. Сивухина «О международной системе физических величин» целиком изложенная в [3]. Также, приведем цитату профессора МФТИ В.А. Овчинкина, которая значительно раскроет мнение Д.В. Сивухина о системах единиц, а, следовательно, и большей части научного сообщества нашей страны (в цитате речь идет о книге [3]): «...он написал ее в гауссовой системе, но в издательстве сказали: «Нет, по стандартам не пройдет». После этого он сказал: “Я перейду на СИ только через мой труп” ...» [5].

Можно, утрируя, сказать, что сегодня СИ – система для измерений, а СГС – система для записи формул и аналитических выкладок. Обе системы по-своему хороши.

Комплексная диэлектрическая проницаемость. Зависимость от частоты

Поляризованность диэлектриков зависит от частоты поляризующего поля. Отсюда очевидно следует, что частотной зависимостью должна обладать и диэлектрическая проницаемость. Поскольку переменное электрическое поле можно представить в комплексном виде как $E(t) = E_m e^{i\omega t}$, то в комплексном виде представляется и электрическая индукция $D(t) = D_m e^{i\omega t}$. При этом амплитуды колебаний D и E связаны соотношением $D_m = \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) E_m$, вследствие чего диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$, характеризующая связь D и E , также является комплексной величиной:

$$\varepsilon^* = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$$

где ε' — диэлектрическая проницаемость вещества, пропорциональная изменению свободной энергии диэлектрика, накопленной диэлектриком за период колебания поля, а ε'' — фактор, пропорциональный поглощаемой за период колебаний поля энергии.

Комплексная диэлектрическая проницаемость применяется в уравнениях, описывающих зависимость эффектов электрического поля от комплексной величины электрического поля $E_0 e^{i\omega t}$ [6].

Описание установок и методики измерений

В данной работе представлено 2 метода измерения диэлектрической проницаемости: электрический и оптический.

Электрический метод измерений

В воздушный конденсатор вносится исследуемый образец и плотно закрепляется между пластинами.

Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

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

Зная геометрию конденсатора (то есть площадь обкладок S и расстояние между ними d) и измерив его емкость, можно вычислить диэлектрическую проницаемость ε по формуле

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}$$

Используемая схема для определения емкости конденсатора приведена на рис.1.

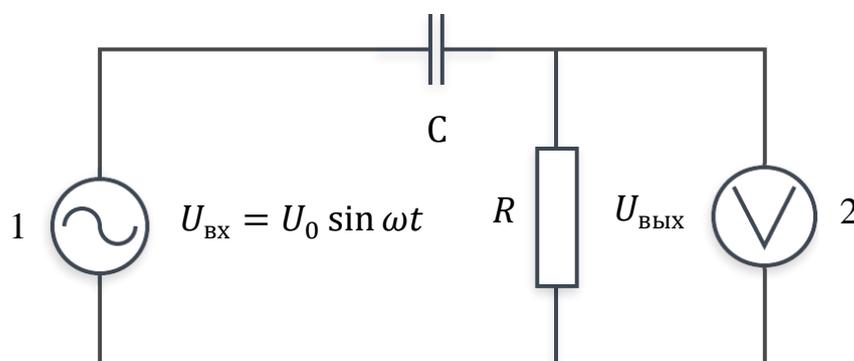


Рис. 1 Схема измерения емкости конденсатора. 1- генератор сигналов ГН-118, 2 – вольтметр В7-16.

Коэффициентом передачи K называется отношение амплитуды выходного напряжения к амплитуде входного напряжения. В данном случае это отношение амплитуды напряжения на резисторе U_{0R} к амплитуде поданного на цепь напряжения U_0 от генератора

$$K = \frac{U_{0R}}{U_0} \quad (5)$$

По закону Ома для переменного тока амплитуды силы тока I_0 и напряжения U_0 связаны соотношением

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + 1/(\omega^2 C^2)}.$$

Тогда амплитуда напряжения на резисторе рассчитывается по формуле

$$U_{0R} = I_0 R = \frac{U_0 R \omega C}{\sqrt{1 + (R \omega C)^2}}$$

и коэффициент передачи (3) будет иметь вид

$$K = \frac{R \omega C}{\sqrt{1 + (R \omega C)^2}}$$

Откуда емкость C может быть определена по формуле

$$C = \frac{K}{\omega R \sqrt{1 - K^2}} \quad (6)$$

Измеряя амплитуды входного и выходного напряжений и определяя K по их отношению (5), вычисляется емкость по формуле (6), а далее и сама диэлектрическая проницаемость.

Однако представленная выше методика измерения, как было замечено в процессе, не подходит для измерения диэлектрической проницаемости исследуемого образца. Объект имеет цилиндрическую форму с радиусом 19 миллиметров и толщиной 5 миллиметров. Сделав оценку емкости конденсатора с заданными размерами, получаем значение порядка пФ. Отсюда можно прийти к выводу, что чувствительности используемых в этой работе приборов недостаточно.

Оптический метод измерений

1. Метод, рассматриваемый в этой работе основан на эллипсометрии. Целесообразно будет чуть подробнее остановиться над самим термином «эллипсометрия».

Под термином «эллипсометрия» понимается раздел оптики, предметом которого являются: 1) разработка методов описания и измерения состояния поляризации светового пучка и тех изменений этого состояния, которые наблюдаются при отражении светового пучка от любой отражающей системы; 2) исследование строения и определение параметров отражающей системы путем анализа изменений состояния поляризации светового пучка при отражении [7]. Метод эллипсометрии априори является косвенным, даже измерения эллипсометрических параметров Ψ и Δ (использующиеся для вычисления оптических параметров отражающей системы) являются косвенными, поэтому необходимо всегда учитывать наличие поверхностного

слоя. Он наиболее удобен для определения оптических констант металлов и измерения параметров тонких пленок на подложках [8].

Классическая принципиальная схема эллипсометра, принятая для реализации нулевых методов приведена на рис. 2. Схема включает в себя поляризатор, после которого параллельный пучок монохроматического света становится линейно-поляризованным; компенсатор, вносящий дополнительную разность фаз; анализатор, работающий по тому же принципу, что и поляризатор, и служащий для выявления определенным образом созданной линейной поляризации света, отраженного от образца.

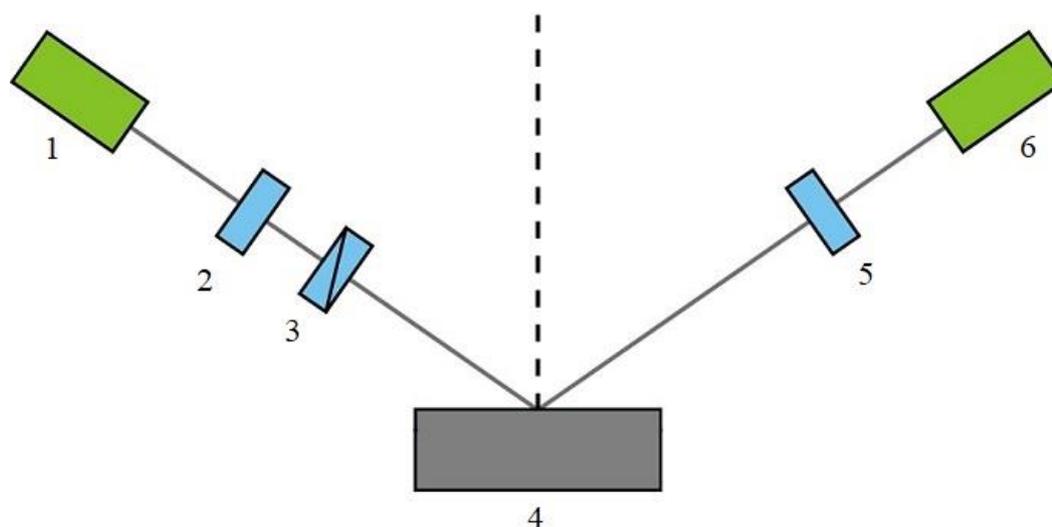


Рис. 2 Принципиальная схема эллипсометра. 1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – компенсатор, 4 – предметный столик, 5 – анализатор, 6 – датчик

2. Суть метода состоит в том, чтобы получить полное гашение света за счет вращения поляризатора и анализатора, после чего снять показания на их лимбах. Все действия производятся в следующем порядке (тут и везде далее: P , A , C – показатели лимбов поляризатора, анализатора и компенсатора соответственно).

- 1) Поставить компенсатор в положение $C_0 + 45^\circ$.
- 2) Установить необходимый угол падения света на образец.
- 3) Поместить образец на предметный столик. Далее с помощью подвижек предметного столика совместить отраженный от образца луч с центром диафрагмы и изображением отверстия зеркальной диафрагмы на экране. Правильный угол падения обеспечивается в том случае, если при вращении столика пятно от лазерного луча не меняет свое положение.
- 4) Вращением анализатора и поляризатора добиться минимума сигнала на выходе. Снять отсчеты с лимбов анализатора A_{1min} и поляризатора P_{1min} .

- 5) Повернуть поляризатора на 90° и вращением анализатора добиться минимума сигнала. Снять отсчеты с лимбов анализатора A_{2min} и поляризатора P_{2min} .

Важно отметить, что значения углов гашения анализатора всегда должны находиться по разные стороны от 180° . Также нужно учитывать правило «большому – большее, меньшему - меньшее». То есть, большому значению угла поляризатора соответствует больший угол анализатора и наоборот, меньшему углу поляризатора соответствует меньший угол анализатора.

- 6) Далее, для четырёхзонных измерений необходимо повернуть компенсатор на $\pm 90^\circ$ и проделать все действия выше.
- 7) Учитывая зоны, воспользоваться следующими формулами для вычисления Δ и Ψ (индексами указана зона):

$$\Psi_{1,2} = \frac{|A_{1min} - A_{2min}|}{2} \quad (7)$$

$$\Delta_{1,2} = P_{1min} + P_{2min} + 2P_0 + 2\pi k \quad (8)$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2.$$

$$\Psi_{3,4} = \frac{|A_{3min} - A_{4min}|}{2} \quad (9)$$

$$\Delta_{3,4} = -(P_{3min} + P_{4min} + 2P_0) + 2\pi k \quad (10)$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2.$$

Согласно [4] диэлектрическая проницаемость для оптических частот выражается формулой

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon + 4\pi i\sigma/\omega$$

Далее, используя тот факт, что диэлектрическая проницаемость является квадратом коэффициента преломления среды [7], по значениям углов Ψ и Δ имеющаяся в лаборатории программа рассчитывает значение $\varepsilon(\omega)$.

Результаты измерений

Модифицированный эллипсометр ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3м заранее были отъюстированы $P_0 = 0^\circ$ и $C_0 = 0^\circ 3'$, длины волн источников $\lambda_1 = 632,8$ нм и $\lambda_2 = 488$ нм для каждого эллипсометра соответственно.

С	Р	А	Р	А
$45^\circ 3'$	$232^\circ 15'$	$169^\circ 39'$	$322^\circ 1'$	$190^\circ 50'$
$135^\circ 3'$	$37^\circ 40'$	$169^\circ 40'$	$127^\circ 58'$	$190^\circ 57'$

Табл. 1 Определение зон на эллипсометре ЛЭФ-2

Построение зон производилось следующим образом. Проводились измерения при углах компенсатора $C_1 = 45^\circ 3'$ и $C_2 = 135^\circ 3'$ по выше изложенной методике для образца с уже известными параметрами, кремния с оксидной пленкой, для которого $\Delta \approx 170^\circ$ и $\Psi \approx 10^\circ 30'$. Подстановкой полученных значений углов поляризатора и анализатора в формулы (7) – (10) и сравнением их с известными результатами (значения рассчитанных Δ и Ψ должны примерно равняться известным) получается построение зон. Отсюда получилось, что угол $C_1 = 45^\circ 3'$ соответствует 3,4 зонам, а $C_2 = 135^\circ 3' - 1,2$.

Перед измерениями образец был тщательно очищен от грязи ацетоном.

С	Р	А	Р	А
$45^\circ 3'$	$135^\circ 18'$	$160^\circ 5'$	$225^\circ 20'$	$200^\circ 31'$
$135^\circ 3'$	$224^\circ 46'$	$200^\circ 32'$	$134^\circ 45'$	$160^\circ 5'$

Табл. 2 Измерения на эллипсометре ЛЭФ-2 с помощью фотоэлектрической регистрации

С	Р	А	Р	А
$45^\circ 3'$	$134^\circ 44'$	$160^\circ 08'$	$224^\circ 49'$	$200^\circ 25'$
$135^\circ 3'$	$135^\circ 17'$	$160^\circ 10'$	$225^\circ 22'$	$200^\circ 26'$

Табл. 3 Измерения на эллипсометре ЛЭФ-2 без фотоэлектрической регистрации

Измерения на эллипсометре ЛЭФ-3м производились без компенсатора. Это означает, что все 4 зоны совпадают. Для данного образца комплексная часть мала и ей можно пренебречь. Поэтому измерения с компенсатором и без не имеют принципиальных отличий [8, 9].

Р	А	Р	А
$225^\circ 24'$	$199^\circ 44'$	$135^\circ 24'$	$160^\circ 30'$

Табл. 4 Измерения на эллипсометре ЛЭФ-3м без компенсатора

Обработка и анализ результатов

По данным таблицы 2, используя формулы (7) - (10) с учетом зон, было получено:

Способ	Ψ	Δ
«на глаз»	$20^\circ 08' 15''$	$0^\circ 33' 15''$
с ФЭУ	$20^\circ 13' 15''$	$0^\circ 33'$

Табл. 5 Углы Ψ и Δ на эллипсометре ЛЭФ-2

При определении эллипсометрических углов по измерениям, полученным на эллипсометре ЛЭФ-3м, можно пренебречь углом Δ , так как измерения проводились без компенсатора [9].

$$\Psi = 19^{\circ}47', \Delta \approx 0^{\circ}$$

Четырехзонные измерения равносильны четырем независимым измерениям. Кроме того, точность измерения достаточна для цели работы. В данном случае статистика многократных измерений существенно не влияет на повышение точности. Ярким примером является сравнение результатов измерений «на глаз» и с помощью фотоэлектрической регистрации положений гашения на выходе эллипсометра.

Далее с помощью имеющейся в лаборатории программы было рассчитано:

$$n_1 = 1,519 - 0,007i; \quad n_2 = 1,531,$$

где n_1, n_2 - коэффициенты преломления среды, полученные из измерений на ЛЭФ-2 и ЛЭФ-3м. Соответственно

$$\varepsilon_1 = 2,307; \quad \varepsilon_2 = 2,344$$

Их значения отличаются из-за различия длин волн используемых источников.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными. Исследуемое вещество оказалось оптическим стеклом К-8 [8, 9].

Выводы

Диэлектрическая проницаемость имеет глубокий физический смысл, требующий рассмотрения с различных позиций. В настоящее время международная система (СИ) – для измерений, а СГС для записи формул и аналитических выкладок. Обе системы по-своему хороши. Для исследуемого объекта электрический метод из-за малости емкости конденсатора оказался сложно реализуемым, в отличие от метода эллипсометрии.

Список литературы

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. том II Электричество
2. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Том 5: Электричество и магнетизм
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. том III Электричество
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Том 8
Электродинамика сплошных сред
5. Семинары Овчинкина В.А. для 2 курса по электричеству и магнетизму.
Занятие 1
6. Ю.А. Гусев. Основы диэлектрической спектроскопии
7. А.В. Ржанов. Основы эллипсометрии
8. Т.Х. Хасанов. Значения показателей преломления объемного кварца//
Оптика и спектроскопия 2015. Т. 118. В. 4. С. 684-692
9. Т.Х. Хасанов. Аттестация и средства контроля эллипсометров//
Автометрия 1997