

УДК 621.387.317

*А.Е. Чижиков, А.А. Лапшин, Д.В. Суворов, А.А. Зеленкевич,
Г.П. Гололобов, А.А. Серезжин, А.И. Мороз*

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЕМКОСТЕЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Для двухслойной и трехслойной диэлектрических структур выведены соотношения для действительной и мнимой составляющих, а также модуля комплексной диэлектрической проницаемости. Определен диапазон значений удельной объемной электропроводности слоев, при которой для известных толщин слоев по измеренному значению электрической емкости структуры возможно получение информации о величине неизвестных значений параметров того или иного слоя. Экспериментальные исследования подтвердили верность проведенного анализа.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, удельная электропроводность, многослойные диэлектрические структуры, миграционная поляризация, электрическая емкость, электродная система пластины плазменной панели, пленка окиси магния.

Введение. Многослойные диэлектрические структуры находят широкое применение в различных электронных компонентах. Процессы переноса зарядов в таких структурах определяются как электрофизическими свойствами отдельных слоев, так и явлениями на границах раздела этих слоев. Известно, что при приложении к диэлектрику переменного или импульсного напряжения проявляется зависимость его электропроводности и диэлектрической проницаемости от различных видов поляризации. Это влияние существенно зависит от соотношения электропроводности и других характеристик слоя. Так, диэлектрическая проницаемость ε^* при этом будет комплексной величиной описываемой формулой Дебая частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости при релаксации:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_\equiv - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота приложенного напряжения, ε_∞ – проницаемость при очень высокой частоте, ε_\equiv – статическая проницаемость при частоте, стремящейся к нулю, τ – время релаксации, т.е. время снижения поляризованности в 2.72 раза после снятия напряжения.

Из данной формулы следуют выражения для действительной ε' и мнимой ε'' составляющих комплексной проницаемости диэлектрика при релаксации:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_\equiv - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad \varepsilon'' = \frac{\omega \cdot \tau (\varepsilon_\equiv - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (2)$$

В многослойных структурах основное влияние оказывает низкочастотная миграционная поляризация, обусловленная явлениями на границах слоев: накоплением зарядов медленно движущихся ионов и ионно-релаксационной поляризацией. При этом высокочастотная поляризация в самих слоях мало изменяется и на низких частотах практически не влияет на комплексную диэлектрическую проницаемость структуры в целом.

При практическом использовании слоистых диэлектрических структур наиболее важными для функционирования изделия обычно являются свойства одного из верхних слоев, наносимым последним в том или ином технологическом процессе. Такие структуры применяются в конструкции жидкокристаллических, электролюминесцентных, плазменных и других видов индикаторов и приборов. Так, трехслойная структура лицевой стороны плазменной индикаторной панели состоит из следующих последовательно расположенных слоев: стеклянная пластина (обкладка) – сетка тонких металлических электродов шириной 70 – 100 мкм – слой легкоплавкого стекла толщиной 28 – 30 мкм – защитный слой окиси магния толщиной 0,5 – 1 мкм. Последний слой защищает легкоплавкое стекло от ионной бомбардировки и обеспечивает высокую вторичную ионно-электронную, фото- и экзоэмиссию в газовом разряде [1].

Анализ результатов ряда работ [2,3] показывает, что в готовой пленке величина коэффициентов, характеризующих эмиссионную способность, однозначно связана с плотностью материала в пленке, кристалличностью структуры и степенью ее стехиометричности. Поэтому одним из методов оценки качества может служить оценка сопротивления (удельной электропроводности) готовой пленки оксида магния.

Одним из возможных методов определения объемного сопротивления при известных значениях всех геометрических размеров и диэлектрических параметров составляющих двухслойной или трехслойной структуры могут служить метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости и последующий расчет удельного сопротивления (электропроводности) слоя в структуре, нанесенной на металлическую подложку.

Цель работы – анализ возможности и разработка методики расчета объемной электропроводности одного из слоев двух- и трехслойной структуры на основе анализа зависимости от частоты комплексной диэлектрической проницаемости структуры.

Аналитическая часть. Конечное сопротивление диэлектрика конденсатора приводит к тому, что его диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной, зависящей от частоты. Введением комплексной диэлектрической проницаемости реальный диэлектрик с проницаемостью ε заменяют идеальным с проницаемостью $\varepsilon^* = \varepsilon - \frac{j\gamma}{\varepsilon_0\omega} = \varepsilon - j\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$. Изменяя емкость на соответствующей частоте, можно по величине рассчитанной диэлектрической постоянной определить какую-либо неизвестную электрофизическую характеристику диэлектрика. Чем выше используемая частота, тем меньше влияние эффектов поляризации. В двухслойных структурах основное влияние оказывает низкочастотная миграционная межслойная поляризация.

Двухслойная структура с конечным сопротивлением слоев была рассмотрена Вагнером в свете представлений Максвелла и носит название конденсатора Максвелла – Вагнера. Приводимые в литературе [4] конечные результаты расчета такой структуры отличаются друг от друга при отсутствии самого вывода этих соотношений. В связи с этим нами был проведен полный расчетный вывод выражений для действительной и мнимой составляющих комплекс-

ной диэлектрической проницаемости. Основные этапы вывода приведены ниже.

Выражение для полного комплексного удельного поперечного сопротивления Z^* двухслойной диэлектрической структуры (рисунок 1) с конечной проводимостью слоев имеет следующий вид:

$$Z^* = \frac{1}{j\omega C_1 + 1/R_1} + \frac{1}{j\omega C_2 + 1/R_2} = \frac{1}{j\omega C^*}; \quad (3)$$

$$Z^* = \frac{1}{\frac{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_1 S}{d_1} + \frac{\gamma_1 S}{d_1}} + \frac{1}{\frac{j\omega\varepsilon_0\varepsilon_2 S}{d_2} + \frac{\gamma_2 S}{d_2}} = \frac{h}{j\omega\varepsilon_0\varepsilon^* S}, \quad (4)$$

где $C_1, R_1, \varepsilon_1, d_1, \gamma_1$ – соответственно удельная емкость, удельное объемное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, толщина и удельная электропроводность слоя № 1. Аналогичные обозначения с индексом 2 относятся к слою № 2.

Величины $h = d_1 + d_2, S, \varepsilon_0, \varepsilon^*, C^*, \omega$ – соответственно полная толщина структуры, площадь, диэлектрическая постоянная, комплексная диэлектрическая проницаемость, комплексная емкость структуры, круговая частота, на которой измеряется комплексная емкость.

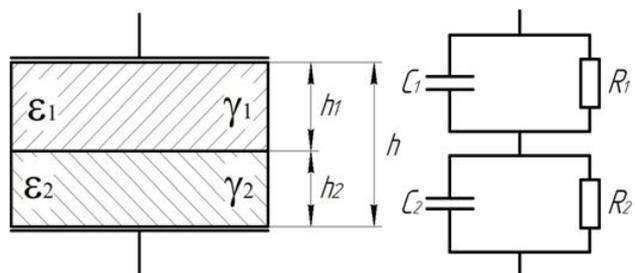


Рисунок 1 – Двухслойный конденсатор и его эквивалентная схема

Преобразуя выражение (2), находим комплексную диэлектрическую проницаемость в виде:

$$\varepsilon^* = h \frac{\left(-\frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2}{j} + \varepsilon_1\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_1 + \frac{\gamma_1\gamma_2}{j\omega\varepsilon_0} \right)}{j\omega\varepsilon_0(\varepsilon_2d_1 + \varepsilon_1d_2) + (\gamma_1d_2 + \gamma_2d_1)}. \quad (5)$$

Умножая числитель и знаменатель на сопряженное знаменателю комплексное число и представляя комплексную диэлектрическую проницаемость в виде разности действительной ε' и мнимой ε'' составляющих $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$, после преобразований получаем следующие выражения для составляющих:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1 d_1 \gamma_2^2 + \varepsilon_2 d_2 \gamma_1^2}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2 \left[1 + \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2} \right]} + \tag{6}$$

$$+ \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2 \left[1 + \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)^2}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2} \right]};$$

$$\varepsilon'' = h \frac{\gamma_1 \gamma_2 (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)}{\omega \cdot \varepsilon_0 (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2 [1 + \omega^2 \tau^2]} +$$

$$+ h \left[\frac{\omega \cdot \varepsilon_0 (\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1) (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2 [1 + \omega^2 \tau^2]} \times \right. \tag{7}$$

$$\left. \times \frac{\{(\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1)(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1) - \varepsilon_1 \varepsilon_2 (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)\}}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2 [1 + \omega^2 \tau^2]} \right].$$

В этих выражениях $\omega = 2\pi f$ (где f – частота, Гц). После введения обозначений и преобразований получаем:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{\equiv}}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\varepsilon_{\infty} \omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = \tag{8}$$

$$= \frac{\varepsilon_{\equiv} + \varepsilon_{\infty} (1 + \omega^2 \tau^2 - 1)}{1 + \omega^2 \tau^2} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2};$$

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\omega \tau (\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\omega \gamma \tau^2 \varepsilon_0^{-1}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \tag{9}$$

где ε_{∞} – проницаемость при очень высокой частоте, ε_{\equiv} – статическая проницаемость при частоте, стремящейся к нулю, γ – эффективная удельная электропроводность двух последовательно соединенных слоев.

$$\varepsilon_{\equiv} = h \frac{\varepsilon_1 d_1 \gamma_2^2 + \varepsilon_2 d_2 \gamma_1^2}{(\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)^2}, \quad \varepsilon_{\infty} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 h}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1},$$

$$\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2 h}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1}, \quad \tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1}.$$

Полученные окончательные выражения позволили уточнить приведенные в [4] на с. 140 выражения для ε' и ε'' :

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\equiv} + \frac{\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad \varepsilon'' = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \omega} + \frac{\omega \tau (\varepsilon_{\equiv} - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2}.$$

Модуль комплексной диэлектрической проницаемости рассматриваемой структуры определяется следующим соотношением:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}. \tag{10}$$

Для трехслойной диэлектрической структуры аналогичная последовательность расчетных действий дает следующее выражение для знаменателя ε^* :

$$\varepsilon_{\text{знам}} = [(h_1 \gamma_2 \gamma_3 + h_2 \gamma_1 \gamma_3 + h_3 \gamma_1 \gamma_2) - \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_2 \varepsilon_3 h_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 h_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 h_3)]^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_2 \gamma_3 h_1 + \varepsilon_3 \gamma_2 h_1 + \varepsilon_1 \gamma_3 h_2 + \varepsilon_3 \gamma_1 h_2 + \varepsilon_1 \gamma_2 h_3 + \varepsilon_2 \gamma_1 h_3)^2. \tag{11}$$

Комплексную диэлектрическую проницаемость представим в виде разности действительной ε' и мнимой ε'' составляющих $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$.

Знаменатель является общим для выражений действительной и мнимой составляющих. Числитель выражения для ε' выглядит следующим образом:

$$\varepsilon'_{\text{числ}} = h \left\{ -\omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \gamma_1 \gamma_2 + \varepsilon_1 \gamma_2 \gamma_3 + \varepsilon_2 \gamma_1 \gamma_3 \right\} (h_1 \gamma_2 \gamma_3 + h_2 \gamma_1 \gamma_3 + h_3 \gamma_1 \gamma_2) - \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_2 \varepsilon_3 h_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 h_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 h_3) + (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_3 \gamma_2 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_2 \gamma_1 \varepsilon_3 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \gamma_3 - \frac{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}{\omega \varepsilon_0}) \cdot \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_2 \gamma_3 h_1 + \varepsilon_3 \gamma_2 h_1 + \varepsilon_1 \gamma_3 h_2 + \varepsilon_3 \gamma_1 h_2 + \varepsilon_1 \gamma_2 h_3 + \varepsilon_2 \gamma_1 h_3), \tag{12}$$

а числитель выражения для ε'' :

$$\varepsilon''_{\text{числ}} = h \left\{ -\omega^2 \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \gamma_1 \gamma_2 + \varepsilon_1 \gamma_2 \gamma_3 + \varepsilon_2 \gamma_1 \gamma_3 \right\} \cdot \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_2 \gamma_3 h_1 + \varepsilon_3 \gamma_2 h_1 + \varepsilon_1 \gamma_3 h_2 + \varepsilon_3 \gamma_1 h_2 + \varepsilon_1 \gamma_2 h_3 + \varepsilon_2 \gamma_1 h_3) - (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_3 \gamma_2 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_2 \gamma_1 \varepsilon_3 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \gamma_3 - \frac{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}{\omega \varepsilon_0}) \times \left[(h_1 \gamma_2 \gamma_3 + h_2 \gamma_1 \gamma_3 + h_3 \gamma_1 \gamma_2) - \omega^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_2 \varepsilon_3 h_1 + \varepsilon_1 \varepsilon_3 h_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 h_3) \right] \} \tag{13}$$

Таким образом:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon'_{\text{числ}}}{\varepsilon_{\text{знам}}}; \quad \varepsilon'' = \frac{\varepsilon''_{\text{числ}}}{\varepsilon_{\text{знам}}}. \tag{14}$$

Численное значение модуля комплексной диэлектрической проницаемости определяется соотношением (10).

Анализ информативности полученных выражений показывает, что, измерив емкость структуры при достаточно низкой частоте и определив измеренный модуль комплексной диэлектрической проницаемости, можно расчетным путем найти любой неизвестный параметр какого-либо из слоев при известных остальных характеристиках слоев.

Полученные конечные выражения для комплексной диэлектрической проницаемости зави-

сят от трёх величин, характеризующих каждый из слоев многослойного диэлектрика: исходной высокочастотной диэлектрической постоянной, удельной проводимости и толщины слоя. Зная эти величины, можно рассчитать ε^* многослойного диэлектрика и емкость конденсатора на его основе.

В другом случае, когда неизвестна какая-либо одна величина, характеризующая многослойную структуру, можно по измеренной емкости конденсатора на основе структуры определить ε^* и рассчитать неизвестную величину.

Для оценки диапазона значений величин, при котором возможно использование рассматриваемого пути, была разработана программа в среде Mathcad на основе полученных выражений и проведены при разной частоте на примере многослойных структур 4-х видов:

Структура А – «металл (обкладка конденсатора) – легкоплавкое стекло (слой 1) – окись магния (слой 2) – металл (обкладка конденсатора)». Параметры соответствующих слоев:

$$\text{а) } \varepsilon_1 = 10; \quad h_1 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ \gamma_1 = 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \quad \varepsilon_2 = 9; \quad h_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\text{б) } \varepsilon_1 = 6; \quad h_1 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \\ \gamma_1 = 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \quad \varepsilon_2 = 9; \quad h_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

$$\text{Ожидаемая величина } \gamma_2 = 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Структура В – «металл – стекло подложки (слой 1) – окись магния (слой 2) – металл». Параметры соответствующих слоев:

$$\varepsilon_1 = 5; \quad h_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \gamma_1 = 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \\ \varepsilon_2 = 9; \quad h_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

$$\text{Ожидаемая величина } \gamma_2 = 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Структура С – «металл – стекло подложки (слой 1) – легкоплавкое стекло (слой 2) – окись магния (слой 3) – металл». Параметры соответствующих слоев:

$$\varepsilon_1 = 5; \quad h_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \gamma_1 = 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \\ \varepsilon_2 = 10; \quad h_2 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \gamma_2 = 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \\ \varepsilon_3 = 9; \quad h_3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

$$\text{Ожидаемая величина } \gamma_3 = 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Структура D – «металл – текстолит (слой 1) – дерево (слой 2) – металл». Параметры соответствующих слоев:

$$\varepsilon_1 = 7; \quad h_1 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \gamma_1 = 3 \cdot 10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}; \\ \varepsilon_2 = 3; \quad h_2 = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \gamma_2 = 2,5 \cdot 10^{-7} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Проведенные расчеты показали, что для двухслойных структур **А**, **В** и трехслойной структуры **С** заметное изменение комплексной диэлектрической проницаемости проявляется

при частотах менее 0,1 Гц и гораздо больших электропроводностях, что не позволяет использовать расчет для определения характеристик слоев.

Результаты расчета для структуры **D** со слоями, имеющими более высокую электропроводность, показали достаточно сильную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от электропроводности одного из слоев в диапазоне частот ниже 40 Гц. Расчетные параметры приведены в таблице 1, а зависимость для частоты 20 Гц – на рисунке 2. Из них следует, что при изменении электропроводности слоя от $5 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ ($\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ диэлектрическая проницаемость (а следовательно, и емкость структуры) увеличивается в 3 раза.

Таблица 1 – Результаты расчёта для структуры **D**

f, Hz	20	30	40
ω, Hz	125,664	188,496	251,327
$1 + \omega^2 \tau^2$	1,003	1,006	1,011
ε'	12,782	12,752	12,71
ε''	58,395	39,319	29,884
ε_{Σ}	59,777	41,329	32,475

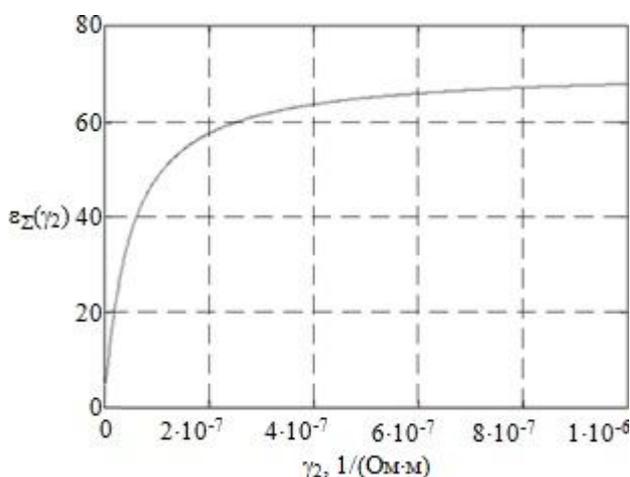


Рисунок 2 – Зависимость $\varepsilon_{\Sigma}(\gamma_2)$ при $f = 20$ Гц для структуры **D**

Для данных слоев структуры **D** время релаксации составляет около 25 секунд, т.е. через 25 с после снятия напряжения структура возвращается в исходное состояние. Само время миграционной поляризации сравнимо с временем релаксации. Это накладывает ограничения на процесс измерения, т.е. период следования импульсов должен быть достаточно малым. Расчет приемлемых для измерения диапазонов электропроводности слоев № 1 и № 2 показал, что при частотах более 10 Гц электропроводности слоев не должны быть менее 10^{-10} и 10^{-11} соответственно.

По результатам расчетов был выбран режим экспериментальных исследований емкости конденсатора на основе опытных образцов двухслойной структуры, изготовленных на предприятии-разработчике.

Экспериментальная часть. Для проверки справедливости полученных соотношений было проведено экспериментальное исследование зависимости емкости двухслойной структуры от величины зарядного тока, определяющего время заряда и позволяющего менять это время в широких пределах. При выбранном зарядном сопротивлении R емкость C определялась по времени $t_{0,5}$ спада тока заряда до уровня 0,5 по следующему соотношению:

$$I_c = I_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right), \quad 0.5I_0 = I_0 \exp\left(-\frac{t_{0,5}}{RC}\right),$$

$$C = \frac{t_{0,5}}{R \ln 2} = \frac{t_{0,5}}{0,693R}.$$

Используемая для измерения тока заряда многослойной диэлектрической структуры схема представлена на рисунке 3.

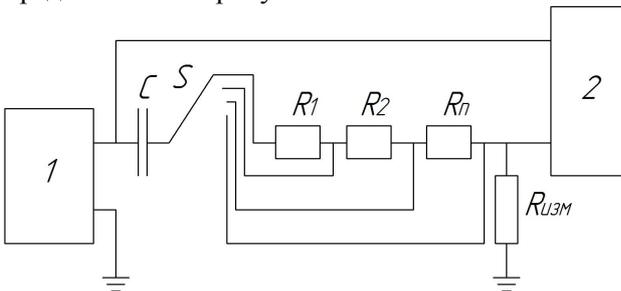


Рисунок 3 – Схема для измерения тока заряда структуры:

1 – генератор импульсов; 2 – осциллограф; С – исследуемая структура; S – переключатель; R_1, R_2, \dots, R_n – последовательно включенные зарядные сопротивления;

$R_{изм}$ – измерительное сопротивление

При измерениях использовались генератор импульсов RIGOL DG1022 и осциллограф Tektronix TDS 2024. С помощью осциллографа определялось время спада тока заряда до половины величины. В качестве зарядных сопротивлений использовались следующие: 50 кОм, 150 кОм, 250 кОм, 4,15 МОм, 9,25 МОм, 13,15 МОм, 19,15 МОм.

Расчеты для двухслойной структуры ЛПС – окись магния показали, что существенное изменение комплексной проницаемости сказывается на частотах менее 1 Гц. Поэтому для подтверждения справедливости выражений (8) и (9) бы-

ли произведены измерения и расчёты для структуры «дерево – текстолит» с большей электропроводностью слоев при $T = 50$ мс; $\tau = 25$ мс; $f = 20$ Гц. Геометрические размеры структуры: толщина слоя текстолита – 4,2 мм, толщина слоя дерева – 6,5 мм, площадь – 3066 мм². Из результатов экспериментальных измерений, приведенных в таблице 2, следует, что при увеличении времени установления поляризации (времени заряда конденсатора) в исследованном диапазоне времен относительная диэлектрическая проницаемость возросла в 2 раза. Это подтверждает справедливость проведенного расчетного анализа (рисунок 2).

Таблица 2 – Результаты экспериментальных измерений

R, кОм	50	250	4150	9250	13150	19350
$t_{0,5}$, мкс	5	16	340	900	1500	2500
C, пФ	92	93	119	141	165	187
ε^* (относ)	1	1	1.28	1.5	1.78	2,01

Анализ результатов и выводы. Проведенные исследования информативности измеряемой и рассчитываемой комплексной диэлектрической проницаемости многослойных диэлектрических структур показали, что при удельной электропроводности слоев в диапазоне $10^{-6} - 10^{-8}$ (Ом·см)⁻¹, толщинах слоев до нескольких мм и их диэлектрической проницаемости не более 10 - 15 возможно достоверное определение той или иной неизвестной (трудно определяемой иными методами) характеристики структуры.

Библиографический список

1. Крылова И.В. Физикохимия поверхности и экзоземиссия с оксида магния//ЖТФ. – 2010. – Т.84. – № 2. – С. 340-346.
2. Лябин А.А., Шариков Г.А., Корницкий Е.У., Волков В. В. Диэлектрические свойства пленок MgO при различных способах их получения//Радиотехника и электроника. – 1979. – Т.24. – Вып.10. – С. 2162-2165.
3. Чижиков А.Е., Кормашова А.А. Исследование возможности контроля качества пленки MgO плазменной панели по её сопротивлению // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4 – 3 (46). С. 87 – 92.
4. Тареев Б.М., Короткова Н.В., Петров В.М., Преображенский А.А. Электроррадиоматериалы: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1978. 336 с.