

УДК 621.318.51

ВОЛЬТФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУР ПЛЕНОЧНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Б.С.Потапов

Основой конструкций всех устройств пленочной электромеханики (ПЭМ) является конденсатор с подвижной обкладкой. Механическая работа, совершаемая этой обкладкой в электрическом поле, может быть определена [1], если известны характеристики $q = q(U, x)$, где q - заряд на конденсаторе, U - внешнее напряжение, а x - параметр - зазор между пластинами конденсатора. Однако в пленочных электромеханических структурах (ПЭМ-структурах) зазоры крайне малы и поддержание их постоянными при определении зависимостей $q = q(U, x)$ практически невозможно. Кроме того, в конкретных конструкциях ПЭМ используются диэлектрические и полупроводниковые слои на одной из обкладок и конденсаторная структура получается двухслойной и, следовательно, двумерно неоднородной (с учетом мест закрепления подвижной пластины). Поэтому в ПЭМ-структурах нет простого линейного соотношения между приложенным напряжением и зарядом.

В таких условиях целесообразнее измерять зависимость емкости C от напряжения $C = f(U)$ и по известной вольтфарадной характеристике определять $q = C(U) \cdot U$. Подробно вопросы электромеханического преобразования энергии, основанного на характеристиках $q = C(U) \cdot U$, рассмотрены в работе [2]. Здесь же заметим, что первоначально измерения вольтфарадных характеристик проводились с целью изучения возможности исключить трудоемкие опыты по определению механических сил. Как показано в работе [3], экспериментальные зависимости $C = f(U)$ позволяют определить механические усилия, возникающие в структуре при приложении разности потенциалов, не прибегая к непосредственным измерениям сил. В дальнейшем простота и оперативность методики определения вольтфарадных характе-

ристик позволили сделать ряд наблюдений, результаты которых не нашли отражения в работе [3], хотя и полезны для определения возможностей и режимов работы емкостных структур ПЭМ. В частности, в данной работе будут сопоставлены зависимости $C = f(U)$ для

а) структур с лентами полиэтилентерефталата (ПЭТФ) различной толщины при параметре $P = \text{var}$, где P - дополнительная масса, окружающая подвижный электрод,

б) структур с диэлектриком SiO_2 ,

в) структур с различной чистотой обработки поверхности неподвижного электрода и др.

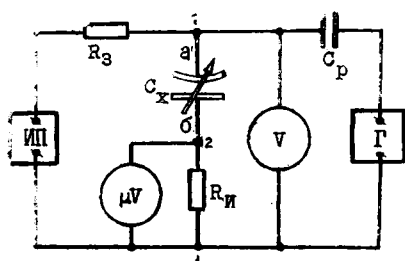


рис. I

Схема измерения. Емкость исследуемых структур измерялась модифицированным методом вольтметра-амперметра. Блок-схема установки показана на рис. I, где ИП - источник постоянного напряжения, R_3 - ограничительное сопротивление, C_p - разделительный конденсатор, Γ - генератор синусоидального тест-сигнала частотой 1 кГц, $R_{И}$ - измерительное сопротивление, μV - селективный, а V - обычный

вольтметры переменного тока, C_x - исследуемая пленочная конденсаторная структура. В схеме использовались приборы ИСН-1, ГЗ-33, В6-2, В6-9 и ВЗ-6, а также следующие номиналы радиодеталей: $R_3 = 160 \text{ к}$, $C_p = 0,05 \text{ мкф} \times 1500 \text{ в}$, $R_{И} = 1,0 \text{ ком} \pm 1\%$.

При измерениях величина тест-сигнала поддерживалась неизменной и равной одному вольту в точках 1,3 схемы. Это позволяло определять емкость C_x непосредственно по показаниям микровольтметра (напряжению на $R_{И}$ в один милливольт при указанных параметрах соответствует емкость $C \approx 160 \text{ пф}$). Монтажная емкость между точками 1,2 схемы (без структуры C_x) составляла $C_{И} \approx 5 \text{ пф}$. Полярность приложенного к C_x напряжения изменялась переключением концов "а" и "б" структуры C_x . Погрешность измерения схемы рис. I определялась сопоставлением с номиналами предварительно отобранных на Е12-1А конденсаторов типа К00 и не превышала $\pm 5\%$ для $27 \leq C_x \leq 3300 \text{ пф}$.

Экспериментальные структуры. Исследовался полимер типа ПЭТФ разных изготовителей и разной толщины в состоянии поставки, что соответствует условиям его применения в ПЭМ-структурах. Толщина пленки определялась как среднее арифметическое по измерениям 8-16 слоев.

На полимерную ленту шириной 13,5 мм и общей длиной до 150-200 мм в вакууме напылялся слой алюминия (Al) шириной $b_m = (10 \pm 0,1)$ мм и толщиной $\delta \approx 700-1000 \text{ \AA}$. Лента с таким электродом укладывалась под прямым углом к продольной оси второго электрода. Измерялась емкость, образованная между скрепленными электродами. Наблюдения проводились в условиях обычного лабораторного помещения при комнатной температуре и, в основном, при нормальном атмосферном давлении и относительной влажности воздуха от 12 до 20%. Отклонения от этих условий будут особо оговорены.

Вторым электродом в разных опытах были:

1) медный (Cu) слой, полученный после травления на фольге - рованном текстолите;

2) слой Al, нанесенный в вакууме на поверхность оптически полированного прямоугольного стеклянного бруска ($15 \times 12 \times 120 \text{ мм}^3$);

3) слой монооксида кремния (SiO_x), толщиной 2,7 мкм, напыленный поверх слоя алюминия на оптически полированном стеклянном бруске;

4) слой Al на аналогичной полимерной ленте;

5) стальные эталоны чистоты обработки поверхности.

Ширина первых четырех электродов составляла $b_3 = (10 \pm 0,1)$ мм и геометрическая площадь обкладки исследуемой емкости равнялась приблизительно $S_1 \approx 1 \text{ см}^2$. В случае стальных электродов эта площадь увеличивалась до $S_2 = (2-3) \text{ см}^2$.

Медный электрод на текстолите используется в практике построения устройств отображения информации и модуляции света [4]. Электрод на полированном стекле служит моделью гладкой поверхности (напыленные слои Al и SiO_x , как известно, повторяют рельеф поверхности). Стальные эталоны чистоты позволяли сопоставить изменение емкости структуры с качеством обработки поверхности электрода.

Предварительные наблюдения. Первые опыты носили постановочный характер. В них использовалась лавсановая лента толщиной 3,5-4,0 мкм, предназначенная для изготовления рулонного конденсатора, т.е. металлический слой, напыленный на ее

поверхность (металлизация) совпадал с одним краем ленты. Вторым электродом являлась медная фольга на текстолите. Было установлено следующее.

I. При подаче на структуру некоторого напряжения смещения U_1 (независимо от его полярности) емкость C_x структуры скачком увеличивалась до значения в 10–30 раз превосходящего первоначальное. Пороговая величина напряжения, при котором происходило это скачкообразное механическое перемещение обкладки, зависела от исходной емкости и жесткости (формы) ленты и была названа напряжением срабатывания. Оно было тем выше, чем меньше была исходная емкость и больше жесткость ленты. После срабатывания, при дальнейшем повышении напряжения, емкость увеличивалась достаточно плавно, хотя отдельные, более мелкие скачки наблюдались и в этом случае. Следует отметить, что достаточно плавное увеличение емкости при повышении разности потенциалов может быть достигнуто и тогда, когда ее начальное значение превосходит некоторый предел (при толщине ленты 3–4 микрона, например, достаточно иметь $C_{нач.} \approx 30$ пф.). В этом случае экспериментально порог срабатывания не обнаружен.

Было замечено, что величина C_x устанавливалась с некоторой задержкой во времени как при увеличении, так и при уменьшении напряжения. В последнем случае уменьшение емкости происходило без явных скачков. На рис. 2, а экспериментальные точки, соответствующие некоторым установившимся значениям C_x (по оси ординат указаны относительные единицы – милливольты), соединены плавной линией всюду, где не происходило существенно скачкообразного изменения $C_x = f(U)$. Прямая (при увеличении напряжения смещения) и обратная (при уменьшении напряжения) ветви вольтфарадной характеристики обнаруживали гистерезис, причем на обратной ветви C – V -характеристики при некотором напряжении U_2 наблюдался минимум емкости структуры. На рис. 2, а прямая ветвь показана сплошной линией и зачерненной стрелкой, обратная – штриховой и светлой стрелкой. Первый квадрант соответствует положительному потенциалу на металлизации ленты и отрицательному электроду, во второй четверти полярность обкладок изменяется на обратную. Зависимость $C_x = f(U)$, показанную на рис. 2, а, начинали снимать в первом квадранте. Однако характер вольтфарадной характеристики не изменялся, если измерения $C_x = f(U)$ начинались во второй четверти. Получившиеся вольт-фарадные характеристики были примерно зеркально-симметричны показанным на рис. 2, а. Далее на всех рисунках будут сохранены обозначения, принятые на рис. 2.

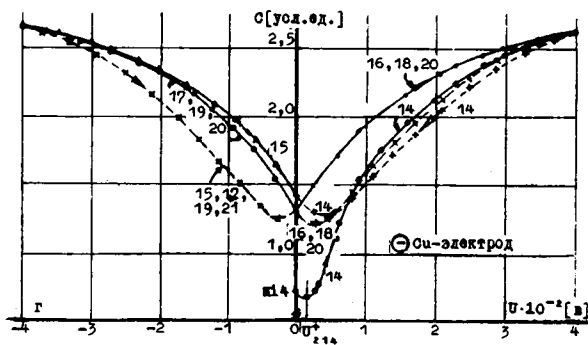
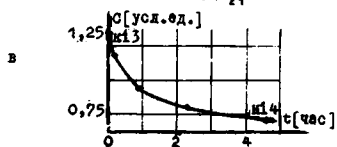
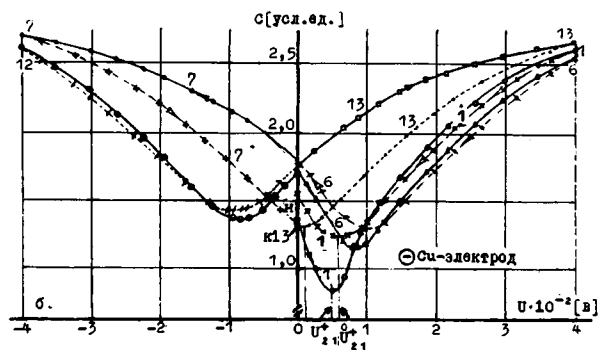
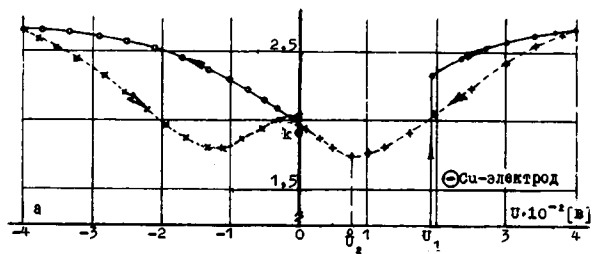


Рис.2. C - V -зависимости ПЗМ-структуры из лавсана 4мкм на Cu -электроде.

2. Начиная с напряжений $U \approx 110-120$ в, а особенно при $U > 200-230$ в прослушивалось характерное потрескивание и наблюдались искровые пробои между нижним электродом и краем металлизации ленты. Пробои отмечались при любой полярности обкладок и сопровождались выгоранием металлического слоя на ленте на $0,3-0,5$ мм от ее края. Образовавшаяся в результате этого процесса диэлектрическая закраина препятствовала развитию искровых разрядов вдоль края ленты. В последующих опытах, во избежание заряжения структуры такими разрядами, полимерные ленты выполнялись с двусторонними закраинами.

3. Простой прижимной контакт, которым в этих опытах осуществлялся подвод напряжения смещения и тест-сигнала к слою металлизации, оказался недостаточно надежным. При искровых разрядах он часто был причиной нарушения гальванической связи подвижной обкладки со схемой, являясь своеобразным плавким предохранителем. В дальнейших экспериментах использовался многоточечный контакт между лентой (ее металлизацией) и десяти-двадцатимикронной алюминиевой фольгой, совместно накрученных рулончиком на луженую проволоку. Такой контакт был надежен даже при искровых разрядах.

4. Применение в структуре ленты с двусторонними закраинами не изменяло вида вольт-фарадной зависимости. По-прежнему подача на образец достаточно большого напряжения (например, 400 в) приводила к появлению гистерезиса и минимумов в зависимости $C_x = f(U)$. При первом нагружении структуры электрическим напряжением минимум в емкости обнаруживался всегда на обратной ветви вольт-фарадной характеристики, но если это было повторное нагружение напряжением той же полярности, то минимум емкости появлялся и на прямой ветви $C-U$ -характеристики. На рис. 2,б показан характер изменения $C_x = f(U)$. Кривая I начинается в точке "н" при $U = 0$, в которую емкость структуры перешла из точки "к" рис. 2,а после полусуточного хранения без внешнего напряжения. И хотя за это время начальная емкость структуры уменьшилась, очевидно, что в ней длительное время сохраняется некоторый заряд. На прямой ветви (кривая I рис. 2,б) обнаруживается минимум емкости при $U_{z1}^+ \approx 50$ в. При понижении напряжения (обратная ветвь, штриховая часть кривой I) минимум смещается в район $U_{z1}^+ \approx 70$ в и становится менее глубоким.

Повторные нагружения структуры электрическим напряжением одинаковой полярности приводят к постепенному смещению минимума в сторону больших потенциалов (кривая б) и уменьшению значений C_x

(кривые 1 и 6). Смена полярности после такого режима ведет к исчезновению минимума на прямой и обратной ветвях вольтфарадной зависимости (кривая 7, рис.2,б) и возрастанию значения емкости. Одновременно резко увеличивается разница в значениях емкостей, соответствующих прямой и обратным ветвям характеристики $C = f(U)$ при одинаковом значении потенциала (возрастает гистерезис). Минимум в зависимости $C = f(U)$ и одновременное уменьшение емкости и сужение гистерезиса могут быть получены повторными нагружениями пленочной структуры электрическим напряжением соответствующей полярности (кривая 12 рис.2,б). После этого, как следует из рассмотрения характера кривой 13, минимум в зависимости $C = f(U)$ при новом изменении полярности обкладок если и появляется, то только на обратной ветви, причем он смещается в сторону меньших значений напряжений ($U_2^{+13} \sim 12$ в).

5. Вид кривых $C = f(U)$ существенно определяется временным фактором. К нему относятся как скорость изменения напряжения, так и интервалы времени, когда внешнее электрическое смещение на структуре отсутствует. Так, зависимости $C = f(U)$, приведенные на рис.2,б, сняты при скорости изменения (увеличения и уменьшения) разности потенциалов одной полярности - 44-33 в/мин. Специально не контролировались также интервалы времени, в течение которых изменялась полярность напряжения, или последнее не подавалось на структуру. Увеличение скорости изменения напряжения до 66 в/мин (для данного образца) и быстрая смена полярности позволяют получить практически симметричные зависимости $C = f(U)$, совпадающие друг с другом от цикла к циклу (рис.2,г). Кривая 14 на этом рисунке начинается из точки "н14", характеризующей начальную емкость структуры после ее релаксации (рис.2,в) от конечного значения емкости (точка "к13") на кривой 13 (рис.2,б). Кривая 14 и прямая ветвь кривой 15 на рис.2,г являются переходными к некоторой установившейся форме $C = f(U)$ (кривые 16,18,20 и 17,19,21 на рис.2,г). Для установившейся формы $C = f(U)$ отмечаются минимумы только на обратных ветвях вольтфарадной зависимости, причем характерным является совпадение глубины и величины минимумов, а также наличие определенной ширины гистерезиса. Сопоставление рис.2,б и 2,г позволяет заключить, что значение напряжения, соответствующее минимуму кривых, понижается при увеличении скорости нагружения структуры электрическим напряжением с изменяемой полярностью.

6. Емкость ПЭМ-структуры с электродом из фольгированного текстолита даже при максимальной величине напряжения составляла, как это следует из рис.2, не более 65% от теоретического значения емкости плоского конденсатора с площадью обкладок $S \approx 1 \text{ см}^2$ и толщиной диэлектрика $\Delta \approx 4$ микрона. Следовательно, в исследуемой структуре физический контакт диэлектрика с неподвижным электродом происходит на ограниченной площади и структура в целом остается двумерно неоднородной. Отсюда возникает задача экспериментально определить площадь физического контакта в зависимости от приложенного к структуре напряжения. Это позволит уточнить оценку равномерно усредненного газового зазора между диэлектрической пленкой и неподвижным электродом, легко получаемую расчетным путем из модели последовательного соединения емкостей собственно диэлектрика и газовой полости.

Поверхность полимерной ленты, распластанной электрическим напряжением по неподвижному электроду, выглядит покрытой бугорками и вздутиями. Последние достаточно подвижны и изменяют свое местоположение и размеры при изменении напряжения. Поэтому можно ожидать увеличения емкости ПЭМ-структуры в вакууме, а также при использовании более гладких неподвижных электродов.

7. Легко заметить, что схема испытаний исследуемой ПЭМ-структуры напоминает схему получения электроэлектретов [5,6] или искусственную пору при изучении частичных разрядов [7]. Тогда механизм возникновения зарядов, ответственных за появление минимума на вольтфарадной характеристике, можно предполагать аналогичным электретному. В [6] указывается, что стабильные электреты могут быть получены при кратковременной (от 100 сек до 10^{-7} сек) поляризации пленок ПЭТФ напряжением 0,5-2 кВ при комнатной температуре. В то же время из формулы (3-30) [7] следует, что в наших условиях, когда максимальная величина приложенного напряжения незначительно превосходит пробивное напряжение воздушного зазора, частота следования частичных разрядов будет весьма мала. Кроме того, как указывается там же, наблюдается затухание разрядов с течением времени. Поэтому в нашем случае не следует ожидать значительного переноса заряда частичными разрядами. Однако из рис.2 следует, что величины остаточных зарядов ($q_{\text{ост.}} \approx C_{\text{min}} \cdot U_{\text{min}}$) сопоставимы с максимальным зарядом в структуре, находящейся под напряжением. Кроме того, легкость, с которой в экспериментах удается изменять знак остаточного заряда при изменении полярности внешнего напряжения, по-

звляет предположить ионный механизм образования остаточных зарядов.

Поскольку частичные разряды в вакууме устраняются или, по крайней мере, резко ослабляется их интенсивность [7], исследование вольтфарадных характеристик ПЭМ-структур в вакууме целесообразно и для выяснения причин возникновения зарядов.

Вольтфарадные характеристики пленочных электромеханических структур в вакууме

Испытания структур проводились в техническом вакууме 10^{-5} – $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Полиэтилентерефталатная пленка размещалась над неподвижным электродом с зазором 10–15 мм и после достижения указанного остаточного давления опускалась на электрод. Электродами в разных опытах служили: медная фольга на текстолите и напыленный на оптически полированный брусок слой Al. Толщина пленки ПЭТФ в этих опытах составляла 3–3,3 мкм. Для каждого опыта использовался новый участок ленты (при измерении величины остаточного заряда обнаружено, что образующийся на ленте заряд локализован в области кажущейся площади контактирования). Установлено, что

1. В вакууме резко сужается гистерезис и при той же, что на рис. 2, г, скорости изменения поляризующего напряжения и независимо от типа неподвижного электрода, уменьшается напряжение минимума на обратных ветвях вольтфарадных характеристик до $U_2^+ \approx 10$ –15 в.

2. Емкость структуры с оптически гладким Al-электродом всегда больше емкости ПЭМ-структуры с электродом из фольгированного текстолита, однако значение теоретической емкости для данной толщины диэлектрика еще не достигается. Так, при $U = 400$ в максимальная емкость для Al-электрода составляет (с учетом разброса по разным опытам) 700–800 пф/см² (79–90%), а для Cu-электрода – только 500–600 пф/см² (56–68%).

3. На вольтфарадных зависимостях в вакууме наблюдается важная особенность. При первом нагружении структуры электрическим напряжением (независимо от его полярности) обратная ветвь C–V-характеристики проходит выше прямой до значений внешнего напряжения $U = 30$ –70 в. Это отчетливо наблюдается при использовании Al-электрода (рис. 3). На фольгированном текстолите обратная ветвь зависимости $C = f(U)$ совпадает с прямой с точностью экспериментального разброса до примерно тех же значений напряжения. При последующих

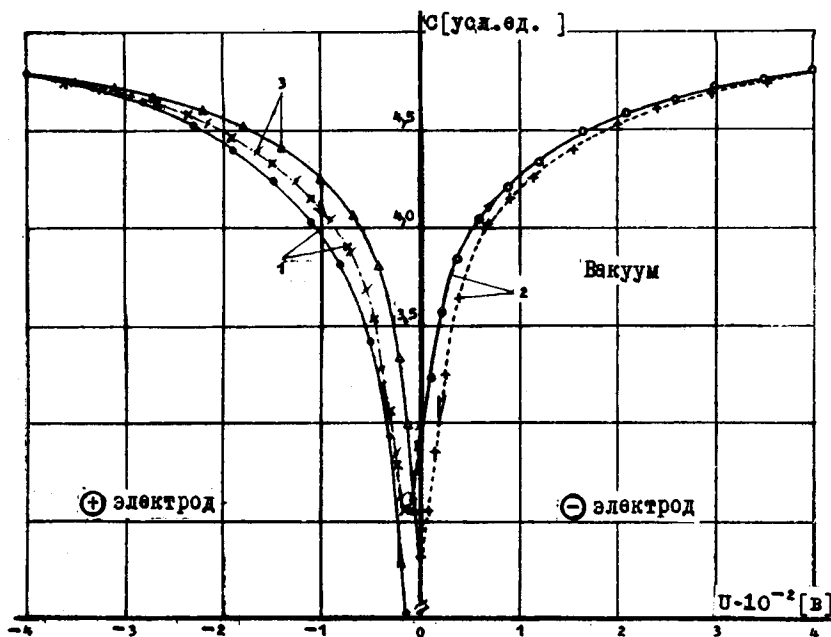


Рис. 3

сменах полярности обратные ветви вольтфарадной характеристики идут ниже прямых.

4. Напуск воздуха приводит к значительному уширению гистерезиса (в 4-6 раз по сравнению с вакуумом) и такому же возрастанию напряжения минимумов в зависимостях $C = f(U)$. Величины емкостей структуры после напуска воздуха практически не изменяются по сравнению с их величинами в вакууме.

5. На величину достижимой в ПЭМ-структуре емкости основное влияние оказывает чистота обработки поверхности неподвижного электрода, среда же в этом отношении играет второстепенную роль. Однако последняя оказывает решающее влияние на ширину гистерезиса и величину напряжения минимумов.

Результаты предварительных наблюдений и опытов в вакууме показали, что перемещение обкладки ПЭМ-структуры происходит в условиях совместного действия внешнего напряжения и поляризационного заряда. Последний, скорее всего неравномерно распределен по

площади кажущегося контакта и изменяется во времени под действием внешнего напряжения. Его изменения интегрируются инерционностью подвижного электрода, что позволяет, при некотором сочетании параметров рассматриваемой электромеханической системы, считать этот заряд постоянным. Так, при определенной скорости изменения внешнего потенциала получаются повторяющиеся вольтфарадные характеристики (рис.2,г), а действие остаточного заряда может быть сведено к действию эквивалентного напряжения. Аналогичные рис.2,г характеристики получены нами и в вакууме, но с другими минимальными значениями емкости и напряжения. Напротив, случайная от опыта к опыту скорость изменения внешнего потенциала приводит к вееру зависимостей $C = f(U)$ (рис.2,б). В вакууме в аналогичных режимах также отмечается веерность вольтфарадных характеристик, но она выражена слабее.

Сопоставление вольтфарадных зависимостей полиэтилен-терефталатных лент разных изготовителей

Предварительными экспериментами было обнаружено, что лавсановые пленки разной толщины, подвергнутые в ПЭМ-структуре поляризации в одинаковом среднем электрическом поле $\bar{E} = \frac{U}{\Delta} \geq E_{\min}$, где U - приложенное к структуре напряжение, Δ - толщина полимера, а $E_{\min}$ - некоторая минимальная напряженность поля, обнаруживают минимум на обратной ветви вольтфарадной характеристики при разных напряжениях. Этот факт послужил толчком к сопоставлению однотипных материалов разных изготовителей. Различия в зависимости $C = f(U)$ должны, по нашему мнению, комплексно отражать в первую очередь свойства поверхности (шероховатость, загрязненность и пр.) полимеров и их механические характеристики (твердость, модуль упругости).

Результаты измерений представлены на рис.4 и в таблице I. Неподвижным электродом в структурах являлся напыленный на оптически полированное стекло слой алюминия. Поляризация образцов проводилась при положительном неподвижном электроде и средней напряженности поля $\bar{E} \approx 1,3 \cdot 10^8$ в/м в течение 10 мин. Затем напряжение снималось и образцы выдерживались 20 мин при внешнем напряжении равном нулю. Определение зависимости $C = f(U)$ начиналось со второго квадранта (определяли только обратную ветвь $C = f(U)$ для данной полярности) и заканчивалось в первой четверти измерением прямой ветви C - V -зависимости. На рис.4 около каждой характери-

стики $C = f(U)$ указан номер образца, а в табл. I – некоторые экспериментальные и расчетные параметры, соответствующие данному образцу.

Для ряда образцов после определения вольтфарадной зависимости находилась величина остаточного заряда. Заряд измерялся при нормальном атмосферном давлении методом подъемного электрода с использованием электростатического вольтметра С-95 с дополнительной емкостью, равной 100 пф. Плотность остаточного заряда не превышала $(1-3) \cdot 10^{-8}$ кул на 1 см² кажущейся поверхности контактирования. Полной разрядки образца никогда не происходило, при повторных подъемах подвижного электрода вновь обнаруживался заряд.

Как видно из рис. 4, вольтфарадные характеристики позволяют различать материалы одинаковой толщины, но разных изготовителей и, по крайней мере, некоторые виды дополнительной обработки. Так, образцы №8-1 и 8-2 исходно идентичны, но образец №8-2 подвергался травлению в щелочном растворе с последующей промывкой в дистиллированной воде и сушкой. Известно [8,9], что обработка в щелочи приводит к матированию поверхности пленок ПЭТФ.

Напряженность электрического поля порядка 10^8 в/м, при которой здесь проведено сопоставление вольтфарадных характеристик, близка к предельной прочности ПЭТФ [10]. При таком поле наблюдался пробой отдельных образцов, в частности №2 и 10.

Сравнение вольтфарадных характеристик может быть проведено при более низких значениях электрического поля и более кратковременном его воздействии. Сравнение возможно даже при полях $E = E_{\min} \approx (1-3) \cdot 10^7$ в/м, после кратковременного воздействия которых на лавсановую пленку в последней практически отсутствуют минимумы в зависимости $C = f(U)$ и явления гистерезиса.

Измерение емкости пленочных структур при дополнительном нагружении их механической силой

Очевидно, что изменение емкости ПЭМ-структуры будет происходить под действием любых сил, вызывающих перемещение ее подвижного электрода. Однако величина и характер этих изменений могут оказаться различными.

Нагружение структур дополнительными механическими силами проводилось следующим образом. По диаметру плоской меры ПМ-15 укладывалась лента полимера (металлизацией к наблюдателю). Поперек нее размещалась односторонне металлизированная лента исследуемой

Т а б л и ц а I

Емкости ПЭМ-структур из пленок ПЭТФ разных изготовителей и их отклонения от C_p

№ об- раз- ца	C_H [пф] [см ²]	Δ , по 16 слоям [мкм]	S_K [см ²]	C_p [пф]	Емкость структуры при				Доля C от C_p при			$q_0 \cdot 10^9$ [кул. [см ²]]	
					+ эл-д U_M^- [в]	C_M^- [пф]	C [пф] при $U = 0$	- эл-д U_M^+ [в]	C_M^+ [пф]	U_M^- [%]	$U = 0$ [%]		U_M^+ [%]
1-1	790	4-4,1	0,978	766	535	630	403	227	593	82,2	52,7	77,4	11
1-2	798	3,4-3,7	0,942	752	480	715	337	205	640	95,3	44,7	85,1	-
1-3	769	3,5	0,990	762	470	685	371	198	637	90	48,7	83,7	-
2	1050	3,5-3,4	1,01	1060	470	827	516	198	747	78	48,7	70,5	14
3	747	4-4,3	0,971	725	535	653	477	227	628	90,1	65,8	86,7	12
4	673	4	0,961	647	535	605	482	227	584	93,5	75,9	90,3	27
5	676	6	0,990	669	830	435	289	350	406	65	43,2	60,6	13,5
6	341	8-8,4	0,981	335	≥ 1100	312	228	460	289	93,1	68,1	86,3	-
7	469	6-6,4	0,971	455	830	390	357	350	395	85,7	78,5	86,8	26
8-1	912	3-3,3	1,08	985	420	467	279	178	435	47,4	28,3	44,2	7,5
8-2	842	3-3,3	0,990	834	420	687	423	178	647	82,3	50,7	77,6	17
9	1090	3-3,1	0,971	1058	400	813	448	170	733	76,8	42,4	69,3	6,7
10	808	3-3,3	0,990	880	420	837	391	178	716	95,2	44,4	81,4	12

Примечание:

C_H - емкость см² пленок ПЭТФ с наполненными Al-электродами, точность измерений - +3%; S_K - площадь контактного контакта между скрепленными электродами; C_p - расчетная емкость, $C = C_H \cdot S_K$; U_M^- , U_M^+ - максимальные напряжения и емкость ПЭМ-структур; q_0 - остаточный заряд на ПЭТФ-пленках.

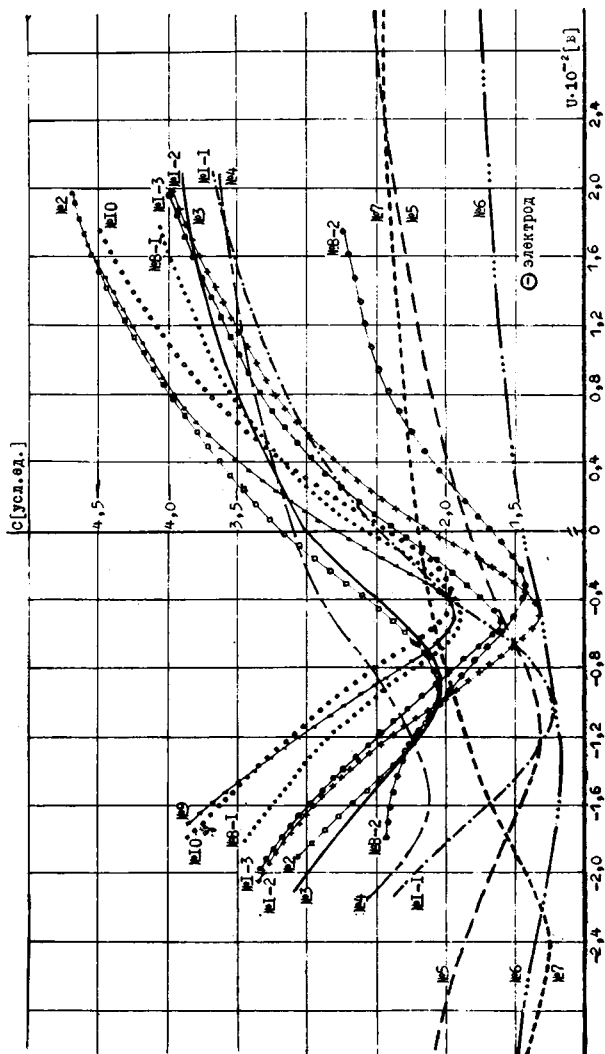


Рис. 4. C-V-зависимости ПЗМ-структур из лавсанов разных толщин и изготовителей на Al-электроне.

толщины. На скрещенные ленты сверху устанавливалась вторая плоская мера ПМ-15 (масса 28 г) или стеклянный полированный кубик со стороной 15 мм и массой 6,6 г. Предполагалось, что размещение емкостной структуры между плоско-параллельными пластинами обеспечивает

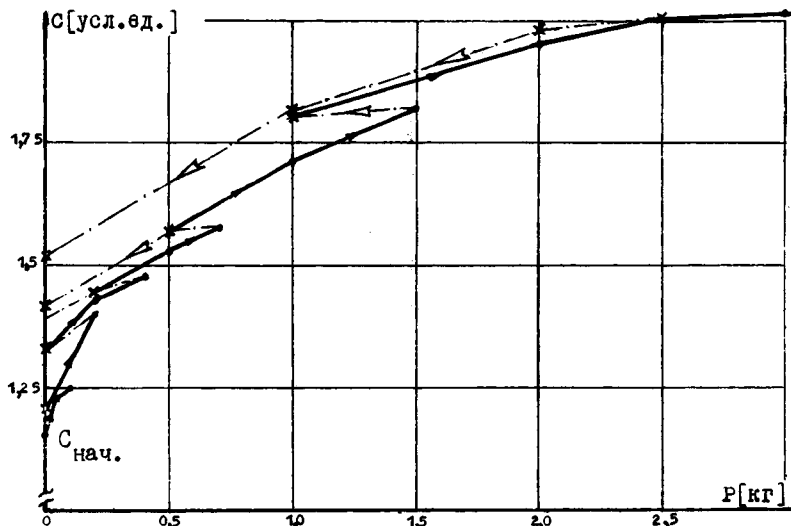


Рис. 5

достаточно равномерную передачу на нее давления от дополнительных грузов. Фрагмент зависимости $C = f(P)$ для лавсана толщиной 3–3,3 мкм показан на рис.5. Начальная емкость структуры соответствует внешней нагрузке 28 г (плоская мера ПМ-15). Сплошные линии на рис.5 соединяют значения емкости, измеренные при увеличении груза, штриховые – при снятии нагрузки. Имеет место значительный гистерезис. Так, при уменьшении внешней силы с 3 кг до нуля остаточная емкость увеличивается по сравнению с начальной в 1,4 раза. Относительное изменение емкости с увеличением внешнего груза уменьшается: увеличение емкости при изменении силы от двух до пяти кг (на рис.5 не показано) составляет только 25% ее общего изменения. Сопоставление данных рис.5 и 3 (и даже рис.2) позволяет утверждать, что при данном способе нагружения механическими силами эффективность изменения C_x значительно ниже, чем при загруз-

ке структуры электрическим напряжением. При механическом нагружении усилие воспринимается отдельными контактными пятнами и, зажатая между неровностями даже оптически полированных стекол, подвижная обкладка не может перемещаться. Изменения же ее емкости становятся возможными либо при изменении площади контактных пятен из-за деформации полимера, либо при случайной смене мест зажатия пленки, например при толчках и вибрациях. Таким образом, в зависимости $C = f(P)$ прослеживаются определенные аналогии с изменением контактного сопротивления от давления $r = f(P)$ [II], тем более, что лавсан, из-за малой контактной твердости, может локально пластически деформироваться.

Сравнение сил, вызывающих одинаковое изменение емкости в зависимостях $C = f(P)$ и $C = f(U)$ недостаточно корректно. Основные электрические силы действуют на подвижную обкладку в зазорах структуры, а механические (в описываемом опыте) - на контактные площадки, т.е. там, где зазора нет. При механическом нагружении емкость структуры изменяется за счет деформации полимера, а при электрическом - за счет поперечного перемещения подвижной обкладки, приводящего как к увеличению площади контактных пятен, так и к уменьшению межэлектродного зазора.

Ниже сопоставлены вольт-фарадные характеристики лавсанов различной толщины при одновременном нагружении структур механическими и электрическими силами. Измерения проводились при средней напряженности электрического поля порядка $3 \cdot 10^7$ в/м с тем, чтобы уменьшить гистерезисные явления. С этой же целью измерения емкости при выбранном значении напряжения проводились поочередно при разных полярностях.

В качестве примера на рис. 6, а показаны C - V -зависимости для пленки ПЭТФ толщиной 12 мкм при различных дополнительных грузах. Электродом в структуре служила вторая такая же пленка (ПЭМ-структура с условно неподвижным электродом). Вид зависимостей $C = f(U)$ различен только в области электрических полей $E \leq (1-3) \cdot 10^7$ в/м. Дополнительная механическая нагрузка увеличивает начальную емкость структуры, но ее действие слабо проявляется при повышении электрического поля. Аналогичным образом ведут себя структуры из пленок других толщин (трех-, шести- и двадцатимикронных), хотя вид их C - V -зависимостей различен. В структурах с условно неподвижным электродом достигаются максимальные изменения емкости. Так, структура, составленная из двух лент толщиной ~ 3 мкм, имеет максималь-

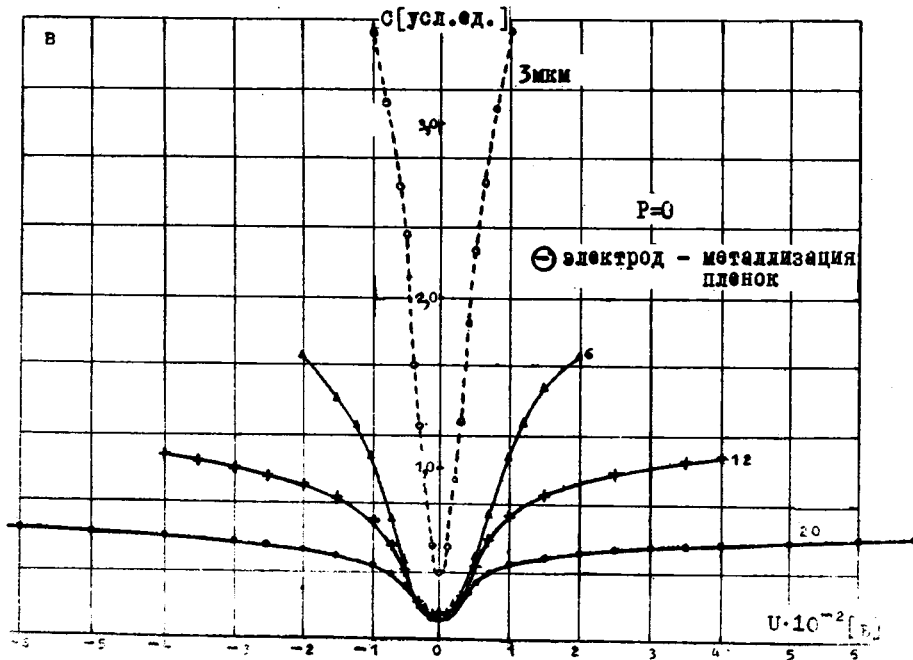
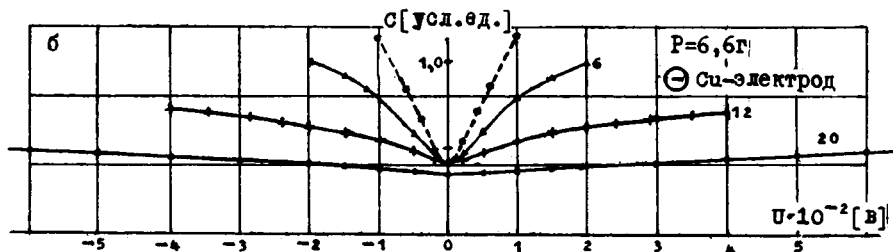
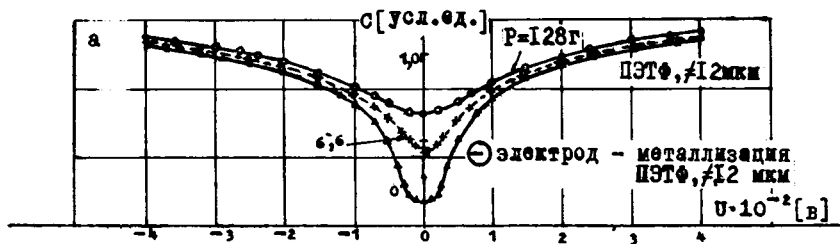


Рис. 4. Зависимости $C = f(U, P, \delta)$ в ПЭМ-структурах с различными электродами.

ную емкость в 1,8–1,4 раза большую, чем структура с одной такой же лентой и действительно неподвижными электродами из пленок Al или Cu, напыленных на оптически гладкий стеклянный брусок, и в 3 раза большую, если таким электродом является медный слой на фольгированном текстолите.

На рис.6,б показаны вольтфарадные зависимости для структур с электродом из фольгированного текстолита и разными толщинами подвижных лент при дополнительной нагрузке 6,6 г. Эти зависимости интересно сопоставить с C-V-характеристиками (рис.6,в, $P = 0$) структур с условно неподвижными электродами. Вновь, как и ранее, можно отметить, что емкость не достигает теоретического значения ни для одной из толщин подвижной обкладки. Однако для относительно толстых пленок наблюдается тенденция к насыщению емкости уже при сравнительно низких значениях средней напряженности поля. В тоже время специальные проверки показали, что C-V-характеристики структур с трехмикронной обкладкой не насыщаются вплоть до 400 в, хотя при таком потенциале наблюдаются пробои отдельных образцов.

Насыщение вольтфарадных характеристик структур с пленками толщиной свыше 8 мкм затруднительно объяснить возникновением газового разряда в воздушных зазорах между поверхностью диэлектрика и электродом. Насыщение $C = f(U)$ начинается в районе 100 в, а для возникновения разряда требуется более высокий потенциал [12]. Удовлетворительным представляется следующее объяснение. Соприкосновение подвижного электрода с неподвижным из-за неизбежных неровностей происходит одновременно во многих точках. Таким образом, вся площадь обкладки разбивается на множество связанных между собой арочек. Толстые пленки обладают большей жесткостью и, скорее всего, большими неровностями поверхности. При возрастании разности потенциалов прогибаются и даже опрокидываются на неподвижный электрод арки с наиболее длинными пролетами, емкость структуры растет. Однако количество точек соприкосновения быстро увеличивается при одновременном укорочении длин пролетов. Теперь увеличение электрических сил практически полностью компенсируется реакцией опор, наступает насыщение C-V-характеристики. В случае более тонкой обкладки, например трехмикронной, опрокидывание какой-либо арки приводит к вздутию, отскоку от поверхности неподвижного электрода соседней, ранее распластанной. Поэтому насыщение вольтфарадной характеристики не наблюдается, а возрастание емкости происходит за счет уменьшения средней высоты арочек и расстояния между их центрами.

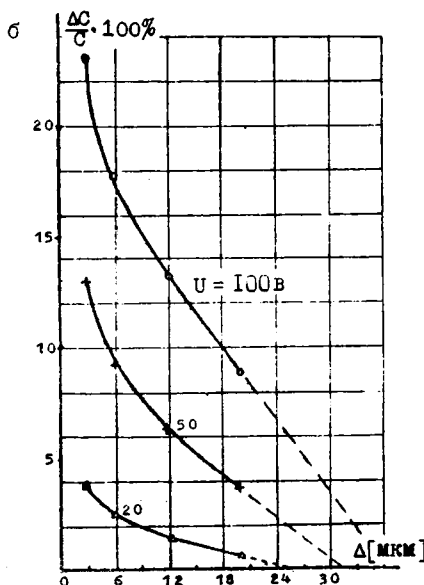
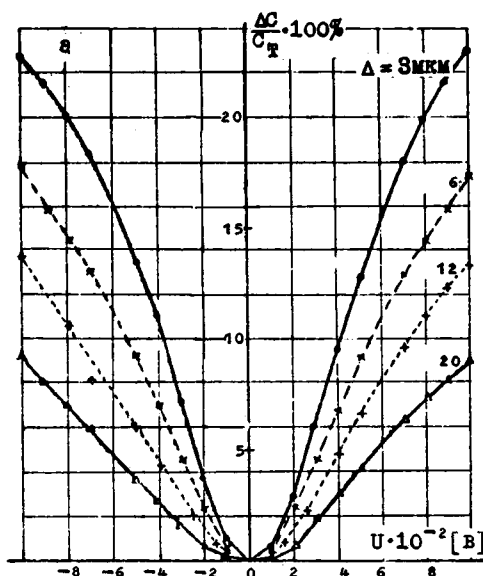


Рис. 7

Вклад жесткости обкладки в С-У-характеристики наглядно демонстрируется следующим опытом. Измерялись вольтфарадные зависимости в структурах с неподвижным электродом, покрытым слоем SiO_2 и обкладками из полиэтилен-рефталатных лент различной толщины. Ленты поворачивались металлизированной стороной к диэлектрику SiO_2 . Результаты сравнения приведены на рис. 7. Рис. 7, а показывает относительное изменение емкости структур при увеличении напряжения смещения. Нормирование проведено к измеренной емкости диэлектрика SiO_2 толщиной 2,7 мкм и площадью напыленных обкладок 1 см^2 . Эта площадь равна кажущейся площади исследуемых структур. Параметром на рис. 7, а являются толщины (Δ) подвижных обкладок. На рис. 7, б показаны зависимости $\frac{\Delta C}{C} = f(\Delta)$ при постоянном напряжении на структуре. Продолжение зависимостей до пересечения с осью абсцисс ориентировочно указывает толщину пленки, при которой для выбранного значения напряжения не будут наблюдаться изменения емкости ПЭМ-структуры.

Экспериментальное определение площади контактирования обладок электромеханических структур

Измеряя ток проводимости в ПЭМ-структуре в зависимости от величины напряжения смещения, можно рассчитать суммарную площадь отдельных контактных пятен по известной величине удельной объемной проводимости (ρ_v) диэлектрика. Однако в структурах с лавсановым изолятором такие измерения крайне затруднены высоким значением его объемного сопротивления (в трехмикронном ПЭТФ-конденсаторе с напыленными Al-электродами измерено значение $\rho_v \approx 3 \cdot 10^{16}$ ом·см). Напротив в ПЭМ-структурах с диэлектриком SiO_x такие измерения достаточно просты и могут быть осуществлены серийными измерительными приборами.

На рис. 8, а показаны зависимости $R = f(U)$ и $C = f(U)$ для структуры с трехмикронной обкладкой (слой металлизации лавсана обращен к SiO_x) и толщиной пленки SiO_x , равной 2,7 мкм. Ток проводимости измерялся электрометрическим усилителем УИ-2 через одну минуту после подачи напряжения смещения. Удельное электросопротивление данной пленки SiO_x ($\epsilon = 4,6$) при $U = 50$ в равно $\rho_v = 2 \cdot 10^{13}$ ом·см. При расчетах площадок контактирования оно принималось неизменным во всем диапазоне значений напряжения. Суммарные площади контактных пятен для структур с разной толщиной подвижных лавсановых обкладок при одинаковых значениях потенциала указаны в табл. 2. Из табл. 2 видно, что при средней напряженности электрического поля $E \approx (3,4) \cdot 10^7$ в/м площадь (в долях $см^2$) непосредственного контакта между обкладками структуры в 5-1000 раз меньше площади кажущегося контакта.

Т а б л и ц а 2

Площадь (в долях $см^2$) фактического контакта подвижной обкладки ПЭМ-структуры с диэлектриком

U [В]	Δ [мкм]			
	3	6	12	20
5	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$		
10	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
17	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$
35	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
52	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
70	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
87	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$
104	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

Сделанная оценка применима и к

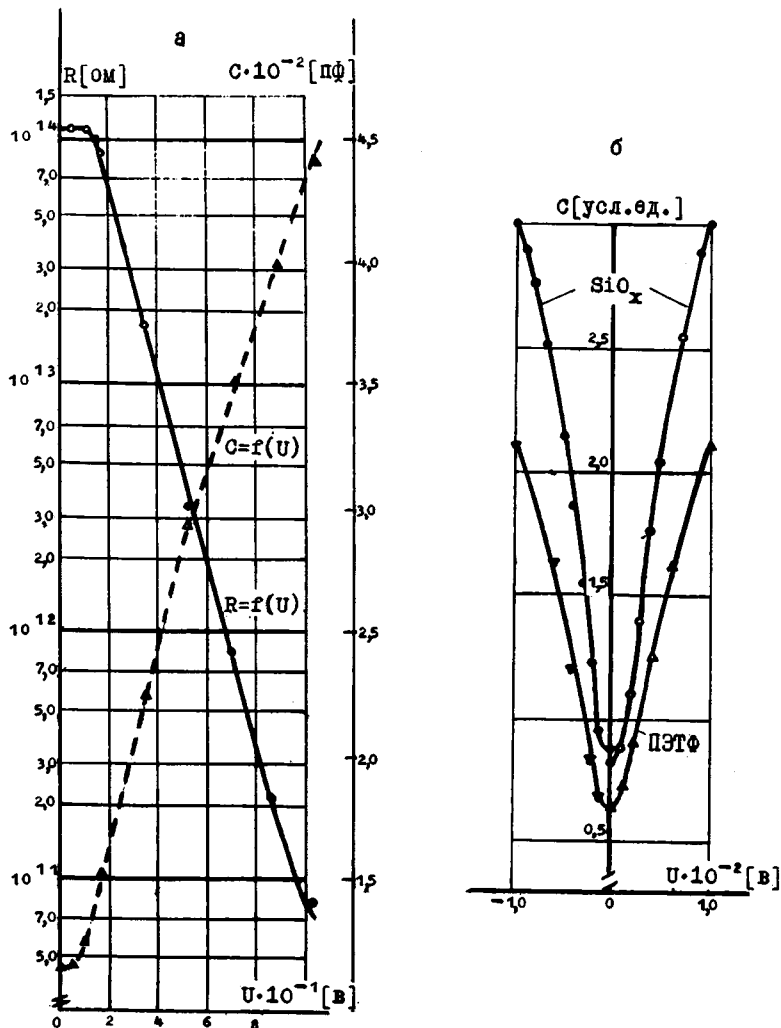


Рис.8. а) Зависимости $C, R=f(U)$ для ПЭМ-структуры с диэлектриком SiO_x . б) Сопоставление $C=f(U)$ для ПЭТФ и SiO_x диэлектриков.

структурам с лавсановым диэлектриком и неподвижным электродом из пленки Al, напыленной на оптически полированный стеклянный брусок. Это следует из рассмотрения рис.8,б, на котором показаны вольтфарадные характеристики структур с диэлектриками SiO_x и ПЭТФ при одинаковой толщине (3 мкм) подвижной обкладки. Несколько большая величина емкости в структуре с пленкой SiO_x просто объясняется более высоким значением ее диэлектрической проницаемости.

Влияние влажности на C-V-характеристики пленочных электромеханических структур

Выдержка структуры с диэлектриком SiO_x во времени под постоянным потенциалом приводит, как и в случае с лавсановым изолятором, к появлению минимумов емкости в вольтфарадных зависимостях. Однако для уверенной фиксации этих минимумов потребовалось увеличить время поляризации. Кроме того, обнаружилось, что

1) минимум в зависимости $C = f(U)$ проявляется при полярности, противоположной поляризующему напряжению;

2) наблюдается заметная релаксация остаточного заряда;

3) при смене полярности поляризующего напряжения для получения другого минимума в C-V-характеристике необходима более длительная, чем предыдущая, выдержка структуры под напряжением.

Сказанное иллюстрируется рис.9 и рис.10. Рис.9,а показывает вольтфарадные характеристики после 45-минутной поляризации структуры во втором квадранте, когда катодом была пленка Al (металлизация), на которую термически нанесен слой SiO_x , а анодом — слой металлизации (электрод) полимерной ленты. Минимум емкости наблюдается после смены полярности (в первой четверти) на прямой ветви вольтфарадной зависимости. На обратной ветви (штриховая линия) C-V-характеристики в этом квадранте еще обнаруживается минимум емкости, но его глубина и местоположение изменяется из-за релаксации заряда. На рис.9,б показаны результаты 150-минутной поляризации (проведенной через несколько часов после предыдущей) при другой полярности. Скорость изменения напряжения в этих опытах составляла 20-15 в/мин.

Сопоставление рис.9 с рис. 2 и 3 показывает, что при поляризации ПЭМ-структур на основе разных диэлектриков (SiO_x и ПЭТФ) возникают противоположные по знаку остаточные заряды. Должного объяснения этому факту сразу отыскать не удалось. Потребо-

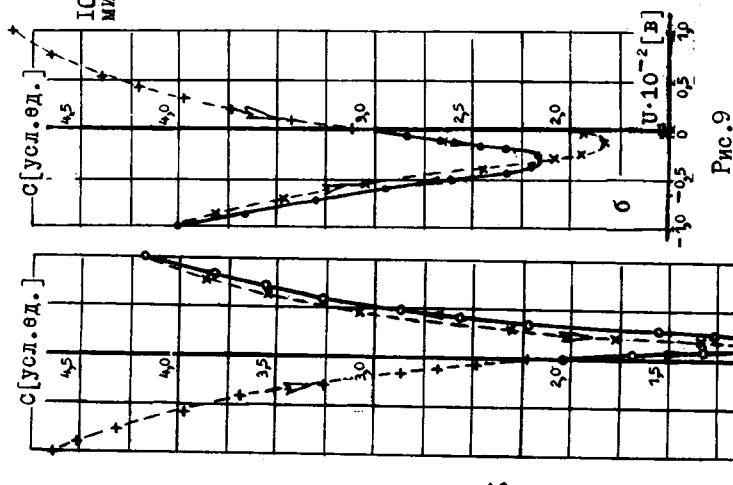


Рис.9

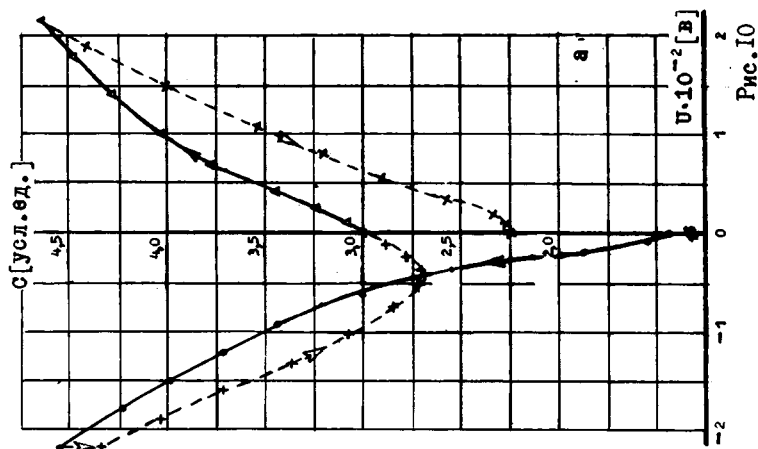


Рис.10

Рис.9,10. ϵ - U -зависимости ПАМ-структуры с диэлектриком SiO_2 при 20% влажности (рис.9) и 55% влажности (рис.10).

вались дополнительные опыты, начавшиеся с проверки предположения, что причиной могут оказаться локальные пробои пленки SiO_x . Но все оказалось проще.

Было обнаружено, что при 55% относительной влажности IO -минутная поляризация ПЭМ-структуры на основе SiO_x при напряжении IOO в приводит к появлению минимума на обратной ветви вольтфарадной характеристики независимо от полярности приложенного напряжения. Минимумы, так же как и в структурах с лавсановым изолятором, наблюдались при полярности поляризирующего напряжения. На рис. $\text{IO}, \text{a}, \text{б}$ показаны вольтфарадные характеристики зависимости $C = f(U)$ при поляризации структуры повышенным напряжением. Сдвиг минимумов произошел в сторону больших напряжений, расширился гистерезис. В процессе выдержки (IO минут) структуры при постоянном внешнем потенциале наблюдается уменьшение емкости. Оказалось также, что структуры на основе SiO_x , в отличие от ПЭТФ-структур, чувствительны к полярности смещающего напряжения. Когда отрицательный потенциал прикладывался к металлизации обкладки, значение напряжения, при котором обнаруживался минимум в C - V -характеристике (рис. $\text{IO}, \text{б}$), было больше, чем при другой полярности электрического поля (рис. $\text{IO}, \text{а}$).

Исследование ПЭМ-структур на основе монооксида кремния в вакууме показало, что после IO -минутной поляризации на C - V -зависимости наблюдается минимум при напряжении, противоположном по знаку поляризирующему. Этот результат качественно совпадает с ранее описанным (рис. $9, \text{а}, \text{б}$). Но после поляризации структуры в вакууме величина напряжения минимумов невелика и составляет 2 – 6 в. Меньшее значение соответствует случаю, когда катодом являлся металлический слой на подвижном электроде. Большие значения напряжений минимумов на рис. $9, \text{а}, \text{б}$ свидетельствуют в пользу механизма локальных пробоев в этом конкретном опыте.

Следует отметить, что после поляризации структуры с диэлектриком SiO_x при какой-либо одной полярности невозможно немедленно получить минимумы в вольтфарадных характеристиках при изменении полярности на обратную, даже если при этом будет увеличено значение поляризирующего напряжения. Это полностью совпадает с наблюдениями, результаты которых показаны на рис. $9, \text{а}, \text{б}$, и указывает на то, что заряд, ответственный за образование в условиях вакуума минимума C - V -характеристики, обладает значительным временем релаксации. Опыты показали, что наблюдаемые в C - V -зависимостях минимумы, положение которых совпадает с полярностью напряжения по-

ляризации, отмечаются для структур с моноокисью кремния еще при 30% относительной влажности. Но уже при влажности 22% в структуре образуется суммарный гетерозаряд.

Смачивание поверхности SiO_2 влажной ваткой с последующей сушкой поверхности батином и 10-минутной поляризацией при 100 в приводит к появлению на вольтфарадных характеристиках глубоких минимумов (подобных показанным на рис. 10, а, б) при напряжениях 20-40 в и увеличению гистерезиса. "Исправление" такой структуры при комнатной температуре крайне затруднительно. Даже после многочасовой откачки в вакууме на вольтфарадных характеристиках (при напряжениях 5-15 в) наблюдались минимумы, положение которых совпадало с направлением внешнего поляризующего поля.

Такой же грубый опыт со смачиванием водой поверхности диэлектрика был проделан и для электромеханических структур с полиэтилентерефталатной пленкой. Оказалось, что после влажной обработки минимумы на обратных ветвях $C-V$ -зависимостей появляются при временных выдержках ПЭМ-структуры при пониженных (до 30-50 в) напряжениях. Заметим, что в обычных условиях при таких напряжениях вольтфарадные характеристики симметричны относительно оси ординат и не имеют минимумов. Для влажной ПЭМ-структуры характерным являются относительно увеличенные значения напряжений минимумов, равные трети и даже половине величины поляризующего напряжения, широкий гистерезис и уменьшенный диапазон изменения емкости. Вольтфарадные характеристики таких структур перестают быть симметричными: при разности потенциалов, противоположной по знаку напряжению поляризации, но равной ему по величине, емкость оказывается максимальной и в 1,5-2 раза превосходит емкость структуры при наибольшем значении поляризующего напряжения. При увеличении разности потенциалов на структуре сверх того значения, при котором проводилась ее выдержка во времени, $C-V$ -зависимости постепенно симметризируются. Это прямо указывает на нестационарность зарядового состояния структуры.

Таким образом, исследуемые нами структуры, даже в случае использования в них в принципе гидрофобных пленок лавсана, являются трехслойными. Кроме собственно диэлектрика и воздушных зазоров, в структурах присутствуют следы H_2O . Именно в проводящей водной пленке под действием внешнего поля происходит разделение ионов противоположных знаков, приводящее после частичного механического разделения обкладок к образованию в структуре остаточного

заряда. На механизм контактного электролитического заряжения указывается в [13]. Там же обращается внимание на то, что при достаточно больших внешних полях электролитическое заряжение может превалировать над контактным. Возможно, что последнее нам удавалось наблюдать при испытаниях ПЭМ-структур с диэлектриком SiO_2 в вакууме или при малой относительной влажности.

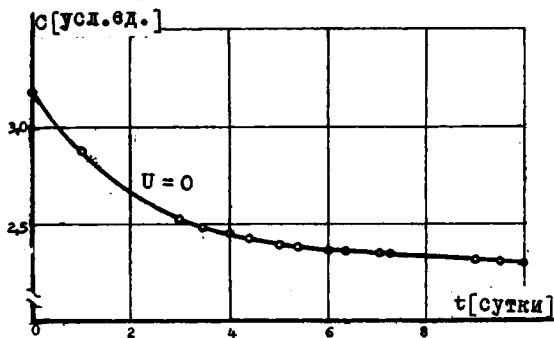


Рис. II

Пленки влаги на диэлектрической поверхности и электроде электромеханической структуры весьма тонки и, вероятнее всего, не являются сплошными. В пользу этого свидетельствует кривая релаксации емкости

ПЭМ-структуры на основе лавсана толщиной 3-3,3 мкм (см. рис. II). Предварительно структура нагружалась электрическим полем с максимумом потенциала 400 в. Анодом являлся слой металлизации полимера. При понижении напряжения на обратной ветви C-V-характеристики наблюдался минимум емкости 440 пФ при 60 в. При $U = 0$ емкость увеличивалась до $C = 510$ пФ. После десяти суток хранения в закрытом объеме с 25% относительной влажностью воздуха емкость структуры уменьшилась до 370 пФ при $U = 0$ и составляла в минимуме 290 пФ при $U = 30$ в.

Влияние на C-V-характеристики чистоты обработки поверхности неподвижного электрода

Зависимость емкости ПЭМ-структуры от чистоты поверхности электрода очевидна из предыдущего. Однако только при измерениях на близких по чистоте поверхностях, например на эталонных стальных мерах $\nabla 6 - \nabla 13$, можно выявить разрешающие возможности рассматриваемой методики. В табл. 3 представлены значения удельной емкости (в условных единицах на 1 см^2 поверхности) в зависимости от напряжения на структуре и примененного электрода.

Т а б л и ц а 3

Удельная емкость (условные единицы) ПЭМ-структуры
для электродов разной чистоты

U [в]	Эталонные стальные меры							
	▽I3	▽I2	▽II	▽I0	▽9	▽8	▽7	▽6
0	0,12	0,10	0,11	0,12	0,12	0,10	0,09	0,08
10	0,35	0,31	0,32	0,31	0,19	0,17	0,12	0,09
20	1,48	1,46	1,50	1,38	0,79	0,34	0,29	0,19
30	2,98	2,80	2,97	2,22	1,77	1,02	0,92	0,53
50	3,60	3,46	3,38	2,80	2,18	1,52	1,26	0,95
80	4,15	3,98	3,97	3,55	2,64	1,98	1,55	1,19
100	4,45	4,20	4,15	3,57	2,85	2,18	1,78	1,30

При измерениях использовалась стандартная ПЭМ-структура с подвижной обкладкой из лавсана толщиной 3-3,3 мкм. Для уменьшения накапливающихся на поверхностях зарядов структура нагружалась переменным напряжением [14] промышленной частоты. Это напряжение в схеме магнитного усилителя модулировалось одновольтным тест-сигналом частотой 1 кГц и с дополнительной обмотки подавалось на структуру. На измерительном сопротивлении, включенном последовательно с исследуемой емкостью, селективным микровольтметром выделялась частота тест-сигнала. При питании структуры переменным напряжением, из-за локальных механических колебаний подвижной обкладки на более высоких, чем основная, частотах, на измерительном сопротивлении появляется дополнительное падение напряжения. Специальными измерениями было установлено, что даже в более жесткой конструкции - петле индикаторного элемента [4] - дополнительные вибрации наблюдаются на 3,5 и 7 гармониках, а их амплитуды уменьшаются как 1:0,14:0,05:0,02. Поэтому в рассматриваемом случае при измерениях емкости не возникает дополнительной погрешности.

Из табл. 3 видно, что измеренные значения емкости в целом достоверно отражают качество обработки поверхности при величинах напряжения 30-100 в. Более высокое напряжение применять не следует для предотвращения случайного пробоя пленочного электрода и из-за

возможности увеличить накопление заряда. При меньших значениях сказывается случайный фактор начальной установки ленты.

Использование ПЭМ-структур для контроля качества обработки деталей представляется аппаратурно более простым, чем измерение усилий электростатического притяжения, предлагаемое в [15] для этих же целей.

Заключение

I. Предложена методика измерения вольтфарадных характеристик пленочных электромеханических структур на постоянном и переменном токе промышленной частоты.

II. Показано, что C-V-характеристики, применяемые при решении вопроса об электромеханическом преобразовании энергии в ПЭМ-структурах [2], чувствительны к факторам внешнего воздействия и могут быть использованы при исследовании физических процессов, сопровождающих работу ПЭМ-структур.

В частности установлено, что

1) вид вольтфарадных характеристик определяется:

а) влажностью окружающей среды;

б) чистотой обработки поверхности электродов;

в) напряженностью электрического поля и продолжительностью его действия;

2) перемещение подвижного электрода ПЭМ-структуры производится электрическими силами, определяемыми суммарным действием внешнего поля и поля нестационарных зарядов. Появление последних связано, в основном, с процессами электролитического заряжения, а не с частичными разрядами, вызванными внешним напряжением. Наблюдавшаяся релаксация вольтфарадных характеристик связана с релаксацией этих зарядов. Применение переменного внешнего напряжения в значительной мере ослабляет накопление остаточных зарядов;

3) механическое и электрическое нагружение ПЭМ-структуры неэквивалентны. Первое приводит к меньшим изменениям емкости.

III. Для различных ПЭМ-структур получены характеризующие их количественные данные, в частности, значения:

а) максимально достижимых удельных емкостей;

б) остаточных зарядов в структуре;

в) площади фактического контакта между обкладками;

г) влажности окружающей среды, при которой относительно невелики гистерезис и нестабильность вольтфарадной характеристики.

IV. Предложенная методика может послужить основой для развития методик

а) сопоставления полимеров разных изготовителей по сдвигу и глубине минимумов на $C-V$ -характеристике,

б) контроля качества обработки поверхностей проводящих или полупроводящих деталей по величине емкости.

В заключение автор считает своим долгом выразить благодарность сотрудникам лаборатории, в которой он работает, и прежде всего В.Л.Дятлову за полезные дискуссии и В.В.Коняшкину за помощь в подготовке экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. ШМИТЦ Н., НОВОТНЫЙ Д. Введение в электромеханику. -М.: Энергия, 1969. - 336 с.
2. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные структуры М-Г-Д-М с подвижными пленками. -Настоящий сборник, с. 3-23.
3. ДЯТЛОВ В.Л., КОНЯШКИН В.В., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с накатом обкладок. -В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып. 84). Новоси-бирск, 1981, с.33-53.
4. КОНЯШКИН В.В., ЛУЦЕТ М.К., ПОТАПОВ Б.С. Пленочные емкостные структуры с электростатическим приводом для устройств отображения информации и модуляции света. -В кн.: Моделирование в пленочной электромеханике (Вычислительные системы, вып. 84). Новоси-бирск, 1981, с. 54-63.
5. ЛУЩЕЙКИН Г.А. Полимерные электреты. -М.:Химия, 1976. -224 с.
6. ГУВКИН А.Н. Электреты. -М.: Наука, 1978. - 188 с.
7. КОЙКОВ С.Н., ЦИНКИН А.Н. Электрическое старение твердых ди-электриков. -Л.: Энергия, 1968. - 186 с.
8. МИХАЛЕВИЧ Д.С. Технология изготовления и размножения гра-фической документации при инженерно-геодезических и маркшейдер-ских работах. -М.: Недра, 1979. - 159 с.
9. ГОЛЬДБЕРГ М.М., КОРЮКИН А.В., КОНДРАШОВ Э.К. Покрyтия для полимерных материалов. -М.: Химия, 1980. - 228 с.
10. НИКУЛИН Н.В., НАЗАРОВ А.С. Радиоматериалы и радиокомпо-ненты. -М.: Высшая школа, 1981. - 221 с.
11. ХОЛЬМ Р. Электрические контакты. -М.: ИЛ, 1961. - 464 с.
12. КАПШОВ Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. -М.-Л.: ГИТТЛ, 1947. - 808 с.
13. ЛЕБ Л. Статическая электризация. -М.-Л.: ГЭИ, 1963. -408 с.
14. СКАНАВИ Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). -М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. - 500 с.

15. Перспективы практического использования полупроводникового взаимодействия зарядов в электрических полях Пасынков В.В., Тайров В.Н., Тонкий Л.В., Хомяков А.Ф. - В кн.: Материалы Всесоюз. конф. "Физика диэлектриков и перспективы ее развития". Т.П. 1973, с. 178-179. (Ленинград, 22-26 октября 1973 г.).

Поступила в ред.-изд.отд.

1 октября 1982 года